

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE

KATARZYNA ŻELAZNY

**METODA WYZNACZANIA
PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ
– PRZYDATNA W PROJEKTOWANIU WSTĘPNYM –
STATKÓW TRANSPORTOWYCH
W STATYSTYCZNYCH WARUNKACH POGODOWYCH
WYSTĘPUJĄCYCH NA LINIACH ŻEGLUGOWYCH**

Szczecin 2015

Recenzenci

JAN A. SZANTYR

BERNARD WIŚNIEWSKI

Opracowanie redakcyjne

KRYSTYNA KAŻMIEROWSKA

Zdjęcie na okładce – rysunek EWA ŻELAZNY

WYDANO ZA ZGODĄ

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-189-9

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

70-311 Szczecin, al. Piastów 48, tel. 091 449-47-60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Druk PPH Zapol, Sobczyk Sp.j., 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 091 434-10-21

e-mail: zarzad@zapol.com.pl

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. WPROWADZENIE	11
1.1. Statek jako środek transportowy	11
1.2. Wstępne projektowanie statku	11
1.3. Miary oceny doskonałości projektu statku	13
1.3.1. Sprawność transportowa	13
1.3.2. Projektowy wskaźnik efektywności energetycznej EEDI	15
1.3.3. Wskaźniki ekonomiczne stosowane do oceny jakości projektu statku	19
2. PRZEDMIOT I CEL PROWADZONYCH BADAŃ	21
2.1. Problem badawczy	21
2.2. Przedmiot badań – prędkość eksploatacyjna statku	23
2.3. Cel badań i tezy	25
3. KONCEPCJA, HIPOTEZY I ZAKRES REALIZACJI BADAŃ	27
3.1. Wstęp	27
3.2. Prędkość eksploatacyjna statku w rzeczywistych warunkach pogodowych	27
3.3. Koncepcja modelu prędkości eksploatacyjnej statku przydatna na etapie projektowania wstępnego	29
3.4. Bazy statków transportowych i ich parametry techniczno-eksploatacyjne	31
3.5. Określenie zakresu aproksymacji parametrów i właściwości statków transportowych	32
3.6. Wykaz parametrów geometrycznych kadłuba statku, znanych na etapie projektowania wstępnego	33
3.7. Poszukiwanie postaci funkcji aproksymującej badane właściwości statku	33
4. ŚRODOWISKO MORSKIE	37
4.1. Elementy środowiska morskiego mające wpływ na średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną statku	37
4.2. Falowanie wiatrowe	37
4.2.1. Falowanie krótkoterminowe	38
4.2.2. Falowanie długoterminowe	41
4.3. Wiatr	45
4.4. Prądy morskie	47
4.5. Wykorzystanie parametrów pogodowych do prognozowania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego	49
5. WYZNACZANIE OPORU STATKU W RZECZYWISTYCH WARUNKACH POGODOWYCH	55
5.1. Wstęp	55
5.2. Opór statku na wodzie spokojnej	55
5.3. Dodatkowy opór od prądu powierzchniowego	59
5.4. Dodatkowy opór od wiatru	60
5.5. Dodatkowy opór od falowania	62
5.6. Dodatkowy opór od steru płetwowego	65
6. MODEL PARAMETRYCZNY CAŁKOWITEGO OPORU STATKU	69
6.1. Wstęp	69
6.2. Modele funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej	69
6.2.1. Opór statku w ruchu prostoliniowym (bez kąta dryfu)	70
6.2.1.1. Określenie zakresu badanych parametrów statków transportowych	70
6.2.1.2. Hipotezy robocze dla oporu R_T	71
6.2.1.3. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla oporu R_T	72

6.2.2. Modele aproksymujące opór statku na wodzie spokojnej podczas ruchu z kątem dryfu	78
6.2.2.1. Hipotezy robocze dla współczynników oporu $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$, $C_m(\beta)$	80
6.2.2.2. Weryfikacja merytoryczna sił oporu na wodzie spokojnej	83
6.3. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od prądu powierzchniowego	85
6.4. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od wiatru	86
6.4.1. Modele funkcji aproksymujących nadwodną powierzchnię statku	86
6.4.1.1. Hipotezy robocze dla powierzchni S_x , S_y	86
6.4.1.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla powierzchni S_x , S_y	87
6.4.2. Modele funkcji aproksymujących współczynniki oporu aerodynamicznego	91
6.4.2.1. Hipotezy robocze dla współczynników oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am}	91
6.4.2.2. Weryfikacja merytoryczna dla współczynników oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am}	92
6.4.3. Weryfikacja merytoryczna dodatkowego oporu od wiatru	96
6.5. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od falowania	99
6.5.1. Hipotezy robocze dla składowych oporu od fali R_{xW} , R_{yW} , M_{zW}	99
6.5.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla składowych oporu od fali R_{xW} , R_{yW} , M_{zW}	102
6.6. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od steru płetwowego	106
6.6.1. Hipotezy robocze dla wielkości A_R , λ , V_R	106
6.6.2. Weryfikacja merytoryczna składowych sił dodatkowego oporu od steru	108
6.7. Końcowa postać modelu aproksymującego całkowity opór statku transportowego	111
6.8. Wnioski z opracowanych modeli parametrycznych całkowitego oporu statku	113
7. WYZNACZANIE NAPORU ŚRUBY I MOCY NAPĘDU STATKU W RZECZYWISTYCH WARUNKACH POGODOWYCH	115
7.1. Napór śruby okrętowej	115
7.1.1. Napór śruby całkowicie zanurzonej	115
7.1.2. Spadek naporu podczas wynurzenia się śruby	116
7.2. Sprawność napędowa i pole pracy silnika	121
7.3. Zmiana punktu pracy układu napędowego pod wpływem dodatkowego oporu	123
8. MODEL PARAMETRYCZNY NAPORU I MOCY NAPĘDU STATKU TRANSPORTOWEGO	127
8.1. Wstęp	127
8.2. Modele aproksymacji naporu T i momentu Q na śrubie napędowej	127
8.2.1. Hipotezy robocze dla naporu T i momentu Q	128
8.2.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna naporu T i momentu Q na śrubie	133
8.3. Modele aproksymacji pola pracy silnika napędowego	139
8.3.1. Modele aproksymacji mocy silnika napędowego	140
8.3.1.1. Hipotezy robocze dla mocy N silnika napędowego	140
8.3.1.2. Weryfikacja merytoryczna dla mocy N silnika napędowego	143
8.3.2. Modele aproksymacji obrotów n_s silnika napędowego	143
8.3.2.1. Hipotezy robocze dla prędkości obrotowej n_s	143
8.3.2.2. Weryfikacja merytoryczna dla prędkości obrotowej n_s	145
8.4. Aproksymacje współczynników do sprawności napędowej	146
8.4.1. Hipotezy robocze dla współczynników t , w_T , η_{RT}	146
8.4.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla współczynników t , w_T , η_{RT}	147
8.5. Wnioski z opracowanych modeli parametrycznych układu napędowego statku	150
9. REDUKCJA PRĘDKOŚCI STATKU ZE WZGLĘDU NA NIEBEZPIECZNE ZJAWISKA WYWOŁANE FALOWANIEM	151
9.1. Warunek redukcji prędkości statku	151
9.2. Prognozowanie kołysań statku i towarzyszących im zjawisk	151
9.2.1. Kołysania statku na fali	152

9.2.2. Przyspieszenia statku na fali	153
9.2.3. Ruchy względne statku na fali	154
9.3. Model parametryczny właściwości morskich statku transportowego	157
9.4. Kryteria oceny właściwości morskich statku	158
10. METODA WYZNACZANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU TRANSPORTOWEGO PRZYDATNA W PROJEKTOWANIU WSTĘPNYM	161
10.1. Wstęp	161
10.2. Chwilowa prędkość eksploatacyjna statku	161
10.3. Średnia statystyczna prędkość eksploatacyjna statku na danej linii żeglugowej	166
11. WYKORZYSTANIE OPRACOWANEJ METODY DO PROGNOZOWANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU TRANSPORTOWEGO NA LINII ŻEGLUGOWEJ NA ETAPIE PROJEKTOWANIA WSTĘPNEGO	169
11.1. Wstęp	169
11.2. Parametry badanych statków i linie żeglugowe	169
11.3. Wyniki obliczeń prędkości eksploatacyjnej dla przykładowych statków i wybranych linii żeglugowych	170
11.4. Wnioski z przeprowadzonych obliczeń prędkości eksploatacyjnej statku transportowego za pomocą metody parametrycznej	180
12. INNE ZASTOSOWANIA OPRACOWANEJ METODY PARAMETRYCZNEJ DO PROGNOZOWANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU NA ETAPIE PROJEKTOWANIA WSTĘPNEGO	189
12.1. Wykorzystanie parametrycznego modelu prędkości eksploatacyjnej w projektowaniu statku	189
12.2. Prognozowanie innych parametrów eksploatacyjnych statku transportowego	191
12.3. Zastosowanie modelu parametrycznego w analizie efektywności energetycznej statku (wskaźnik EEDI)	195
12.4. Zastosowanie modelu parametrycznego w optymalizacji trasy żeglugi statku transportowego	197
12.4.1. Wstęp – uwagi o optymalizacji trasy żeglugi statku	197
12.4.2. Podstawowe podejście przy wyborze trasy żeglugi	197
12.4.3. Zastosowanie opracowanego modelu prędkości eksploatacyjnej do prognozowania trasy żeglugi statku	199
12.4.4. Eksperymentalny program komputerowy PRESTAT	200
12.4.5. Weryfikacja obliczeń spadku prędkości statku	203
13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	207
LITERATURA	211
Summary	219
Zusammenfassung	221

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A_R	[m ²]	– powierzchnia steru
A_E/A_0	[–]	– współczynnik powierzchni wyprostowanej śruby napędowej
B	[m]	– szerokość statku
C_B	[–]	– współczynnik pełnotliwości podwodzia kadłuba statku
C_M	[–]	– współczynnik pełnotliwości owręża
C_P	[–]	– współczynnik pełnotliwości wzdłużnej
C_{WP}	[–]	– współczynnik pełnotliwości wodnicy
C_{Ax}, C_{Ay}, C_{Am}	[–]	– współczynniki oporu aerodynamicznego nadwodnej powierzchni statku
C_x, C_y, C_m	[–]	– współczynniki sił oporu i momentu obracającego statek na wodzie spokojnej
C_{wx}, C_{wy}, C_{wm}	[–]	– współczynniki falowej siły dryfu od fali regularnej
D_p	[m]	– średnica śruby
$D_{\zeta\zeta}$	[m ²]	– wariancja falowania
f_A	[–]	– prawdopodobieństwo przebywania statku na akwencie A
f_S	[–]	– prawdopodobieństwo przebywania statku w porze roku S na akwencie A
f_{HT}	[–]	– prawdopodobieństwo wystąpienia fali o parametrach H_S, T_I
f_{VA}	[–]	– prawdopodobieństwo wystąpienia średniej prędkości wiatru \bar{V}_A
f_γ	[–]	– prawdopodobieństwo wystąpienia kierunku wiatru γ
f_μ	[–]	– prawdopodobieństwo wystąpienia kierunku fali μ
g	[m/s ²]	– przyspieszenie ziemskie
H	[m]	– wysokość boczna statku
H_S	[m]	– znacząca wysokość fali
h_{ws}	[m]	– wysokość wynurzenia się śruby
H_w	[m]	– wysokość fali
J	[–]	– współczynnik posuwu śruby napędowej
K_T	[–]	– współczynnik naporu śruby napędowej
K_Q	[–]	– współczynnik momentu śruby napędowej
k_z	[–]	– dodatek żeglugowy
L	[m]	– długość statku między pionami
L_{WL}	[m]	– długość statku na wodnicy pływania
M_n	[kNm]	– moment nominalny silnika napędowego
n_s	[1/s]	– prędkość obrotowa silnika
n_p	[1/s]	– prędkość obrotowa śruby napędowej
N_n	[kW]	– moc nominalna silnika
P	[m]	– skok śruby napędowej
P_B	[kW]	– moc zainstalowanego napędu

P_D	[kW]	– moc dostarczona do stożka śruby
P_E	[kW]	– moc holowania
P_N	[t]	– nośność statku
P_S	[kW]	– moc na linii wałów
p_w	[–]	– prawdopodobieństwo przebywania statku w danej sytuacji podczas żeglugi po sfalowanej wodzie
P/D_p	[–]	– współczynnik skoku śruby napędowej
Q	[kNm]	– moment obrotowy śruby napędowej
R_C	[kN]	– całkowity opór statku
R_{Cx}, R_{Cy}, M_{Cz}	[kN, kN, kNm]	– składowe całkowitego oporu i moment obrotowy dla statku płynącego w rzeczywistych warunkach pogodowych
R_T	[kN]	– opór statku na wodzie spokojnej dla ruchu prostoliniowego, bez kąta dryfu
R_x, R_y, M_z	[kN, kN, kNm]	– składowe siły oporu i moment dla statku na wodzie spokojnej podczas pływania z kątem dryfu
R_{xA}, R_{yA}, M_{zA}	[kN, kN, kNm]	– składowe średnie siły i moment oddziaływania wiatru na statek
$R_{xCV}, R_{yCV}, M_{zCV}$	[kN, kN, kNm]	– składowe siły oporu i moment dla statku płynącego na wodzie z prądem powierzchniowym
R_{xR}, R_{yR}, M_{zR}	[kN, kN, kNm]	– składowe siły i moment na sterze płetwowym
R_{xW}, R_{yW}, M_{zW}	[kN, kN, kNm]	– składowe średnie siły i moment oddziaływania nieregularnej fali
S	[m ²]	– rzut bocznej powierzchnia podwodnej kadłuba na PS
S_x, S_y	[m ²]	– rzuty powierzchni nadwodnej części statku na płaszczyznę owręża i symetrii
$S_{\xi\xi}(\omega)$	[m ² s]	– funkcja gęstości widmowej energii falowania
SFC	[g/kWh]	– jednostkowe zużycie paliwa przez silnik napędowy statku
t	[–]	– współczynnik ssania
T	[m]	– zanurzenie statku
T	[kN]	– siła naporu
T_{P0}	[m]	– zanurzenie osi śruby
T_w	[s]	– okres falowania
T_{zS}	[m]	– zanurzenie wierzchołka skrzydła śruby w jego górnym położeniu
\bar{T}_0	[s]	– średni okres fali odniesiony do miejsc zerowych
TEU	[–]	– liczba kontenerów przeliczona na kontenery jednostkowe
V	[m/s]	– prędkość statku
V_C	[m/s]	– prędkość prądu powierzchniowego
V_E	[m/s]	– prędkość eksploatacyjna statku
V_K	[m/s]	– prędkość kontraktowa
V_R	[m/s]	– prędkość dopływu wody do steru
V_x, V_y	[m/s]	– składowe bezwzględnej prędkości statku
\bar{V}_A	[m/s]	– średnia prędkość wiatru

w_T	[–]	– współczynnik strumienia nadążającego
Z	[–]	– liczba skrzydeł śruby napędowej
∇	[m ³]	– wyporność (objętość) statku
α_R	[deg]	– efektywny kąt natarcia steru
β	[deg]	– kąt dryfu statku
β_A	[deg]	– kierunek wiatru względem statku
β_C	[deg]	– kierunek prądu względem statku
β_W	[deg]	– kierunek fali względem statku
ΔR	[kN]	– dodatkowy opór statku pochodzący od oddziaływania wiatru i fali oraz od urządzeń sterowych
δ_R	[deg]	– kąt wychylenia steru płetwowego
γ_A	[deg]	– geograficzny kierunek wiatru
γ_C	[deg]	– geograficzny kierunek prądu powierzchniowego
η	[–]	– ogólna sprawność napędowa statku
η_M	[–]	– sprawność części mechanicznej układu przeniesienia mocy statku
η_D	[–]	– sprawność części hydrodynamicznej statku
η_G	[–]	– sprawność przekładni
η_S	[–]	– sprawność linii wałów
η_{HT}	[–]	– „sprawność” kadłuba
η_{RT}	[–]	– „sprawność” rotacyjna
η_0	[–]	– sprawność pędnika odosobnionego (śruby napędowej pracującej bez kadłuba)
μ	[deg]	– geograficzny kierunek fali
ρ_A	[t/m ³]	– gęstość powietrza
ρ_w	[t/m ³]	– gęstość wody
ω	[1/s]	– częstość fali regularnej (harmonicznej)
ω_E	[1/s]	– częstość spotkaniowa
ψ	[deg]	– geograficzny kurs statku

1. WPROWADZENIE

1.1. Statek jako środek transportowy

Transport morski to zespół czynności i środków technicznych służących do przemieszczania osób i ładunków drogą morską. Środkami technicznymi w tym przypadku są różnego typu statki towarowe i pasażerskie, które są także środkami produkcji usług przewozowych. Zarządzaniem statkiem (statkami) i jednocześnie świadczeniem usług transportowych zajmuje się przedsiębiorstwo armatorskie, które jest z ekonomicznego punktu widzenia jednostką gospodarczą. Celem każdej działalności gospodarczej, w tym również w zakresie transportu morskiego, jest uzyskanie maksymalnego efektu ekonomicznego. Efekt ten można osiągnąć zgodnie z zasadami racjonalnego gospodarowania przez:

- maksymalizację dochodów przy określonym poziomie kosztów,
- minimalizację kosztów przy określonym poziomie dochodów,
- maksymalizację dochodów przy jednoczesnej obniżce kosztów.

Różnica pomiędzy przychodami a kosztami armatora stanowi jego wynik finansowy, który oczywiście może być dodatni lub ujemny (przy ujemnym armator ponosi straty).

Przychód armatora wynika ze stawek frachtowych za przewożony ładunek. W dobie silnej konkurencji w transporcie morskim stawki frachtowe, przynajmniej na niektórych liniach żeglugowych i dla niektórych towarów, są stabilne i ulegają tylko małym wahaniom. Armator często w małym stopniu może wpływać na poziom stawek frachtowych.

Koszty armatora to [58]:

- koszty utrzymania statku, m.in. płace załogi, ubezpieczenia, remonty, amortyzacje, koszty paliwa, opłaty portowe itp.,
- koszty ładunkowe i ruchu,
- koszty administracyjne.

Wiele tych kosztów ma charakter stały i armator w małym stopniu może je zmieniać. Duży jednak wpływ na te koszty ma sam projekt statku, a głównie jego parametry projektowo-eksploatacyjne, takie jak: nośność, prędkość eksploatacyjna, zużycie paliwa, jak i koszt budowy samego statku. Biorąc pod uwagę, że wiele kosztów armatora jest podobnych do kosztów innych armatorów, to zamawiając i projektując statek o odpowiednich parametrach projektowo-eksploatacyjnych armator może osiągnąć lepszy efekt ekonomiczny. Właściwy więc wybór parametrów projektowo-eksploatacyjnych w trakcie projektowania statku może mieć istotny wpływ na przyszłe zyski armatora.

1.2. Wstępne projektowanie statku

Przy budowie statku lub też dowolnego innego obiektu pływającego ogromną rolę odgrywa projektowanie, które jest podzielone na kilka etapów powiązanych z całym cyklem budowy nowego statku. Mimo że koszt wykonania całego projektu wynosi zaledwie kilka procent

ceny statku, to jednak ma on decydujący wpływ na koszt budowy (jest to szczególnie ważne z punktu widzenia stoczni budującej statek), a także istotnie wpływa na późniejsze efekty ekonomiczne armatora podczas eksploatacji statku. W monografii [16] pokazano jak decyzje podejmowane na wstępnych etapach projektowania, przy stosunkowo małej wiedzy na temat projektowanego statku, mają ogromny wpływ na efekt końcowy, czyli na zbudowany statek. W końcowych etapach projektowania statku, mimo że wiedza na temat jego właściwości jest już duża, wprowadzanie zmian w konstrukcji jest ograniczone ze względu na duże koszty ich uwzględnienia.

Opracowanie metod, umożliwiających stosunkowo dokładne określenie podstawowych parametrów projektowych i eksploatacyjnych, przydatnych na etapie wstępnego projektowania, jest więc niezwykle istotne, ponieważ pozwoli projektować statek spełniający nie tylko wymagania armatora, ale również maksymalizować zysk z przyszłej eksploatacji statku.

W tradycyjnym projektowaniu projektant poszukuje optymalnego rozwiązania spełniającego wymagania armatora (głównie założona prędkość i nośność statku) przy spełnieniu kryteriów technicznych (np. pływalność, stateczność, niezatapialność), które w procesie optymalizacji stanowią ograniczenia. Celem osiągnięcia jak najlepszych wyników jest taki wybór parametrów projektowych statku, przy których moc napędu i ewentualnie koszty budowy statku będą możliwie małe [16, 3, 62, 78]. Efektem jest projekt wstępny statku, spełniający wszystkie powyższe założenia armatora i kryteria techniczne, ale bez gwarancji, że zbudowany statek będzie maksymalizował zyski armatora w trakcie jego eksploatacji. Armator na podstawie swojego doświadczenia potrafi z większym lub mniejszym prawdopodobieństwem określić optymalną nośność i prędkość statku, który chce zamówić w stoczni, ale projektowanie mające na celu maksymalizację dochodów, przy jednoczesnej obniżce kosztów eksploatacji statku, jest w tym przypadku niemożliwe.

Armatorzy eksploatują statki, oczekując zysków, stąd osiągnięcie celu jakim jest maksymalizacja zysku wymaga innego podejścia do projektowania wstępnego statku. Do procesu projektowania muszą być włączone dodatkowe kryteria ekonomiczne [64] i odpowiednio do tego celu opracowane metody projektowania. O takim nowym podejściu do projektowania statku transportowego, w jednej z najważniejszych pozycji w tej dziedzinie [60], autorzy stwierdzają: *nie wystarczy powiedzieć, że statek ma być projektowany w ten sposób by spełniał wymagania armatora i zakładać, że wymagania te są najlepsze z możliwych. Podstawowym celem armatora jest osiągnięcie korzyści ekonomicznej.*

Przy takim podejściu do projektowania statku transportowego efektem prowadzonej optymalizacji będzie projekt wstępny statku, uwzględniający kryteria techniczne i dodatkowo ekonomiczne, a nośność i prędkość statku będą w tym przypadku wynikowe z przeprowadzonego procesu projektowania. Wprawdzie nadrzędnym celem optymalizacji będą maksymalne zyski armatora, to także i w tym przypadku podczas projektowania należy dążyć do zminimalizowania oporu statku, kosztów budowy, a ostatnio także emisji CO₂ podczas eksploatacji statku.

1.3. Miary oceny doskonałości projektu statku

Aby osiągnąć optymalne parametry projektowe statku stosuje się różne kryteria – cele optymalizacji:

- minimalny opór statku (z czym wiąże się mniejszy koszt eksploatacji wynikający z mniejszego zużycia paliwa);
- minimalny negatywny wpływ na środowisko morskie (co osiąga się przez zmniejszenie emisji spalin, a konkretnie CO₂ i innych szkodliwych składników);
- minimalny koszt budowy statku (co wiąże się ze zmniejszeniem kosztów eksploatacji w części związanej ze spłatą kredytu);
- maksymalny zysk armatora z eksploatacji statku.

Osiągnięcie tych wszystkich celów jednocześnie nie jest możliwe bez powiązania ich z określonymi założeniami, jak np. prędkością, nośnością lub objętością przewożonego ładunku.

Mimo stosowania zaawansowanych metod komputerowych i coraz dokładniejszych modeli matematycznych, opisujących zależności pomiędzy parametrami projektowo-eksploatacyjnymi, proces projektowania statku nadal prowadzony jest w sposób iteracyjny. W procesie projektowania, projektant, stosując różne metody, poszukuje najlepszego rozwiązania spełniającego wymagania armatora (ilość i rodzaj przewożonego ładunku, prędkość i autonomiczność statku, linia lub linie żeglugowe, na których będzie eksploatowany statek) oraz ograniczeń technicznych wynikających głównie z bezpieczeństwa statku podczas pływania po morzu. Nawet, jeżeli stosowane są metody optymalizacyjne, poszukiwane rozwiązanie (projekt statku) poddawane jest ocenie i ewentualnie poszukuje się lepszego rozwiązania.

Do oceny otrzymanych rozwiązań, w tym przypadku projektu statku transportowego, stosowane są określone miary. Najczęściej stosowanymi miarami oceny doskonałości statku są (stosowanymi także do innych środków transportowych):

- sprawność transportowa,
- projektowy wskaźnik sprawności energetycznej IMO,
- wskaźniki ekonomiczne.

1.3.1. Sprawność transportowa

Sprawność transportowa jest jednym z najstarszych wskaźników oceny jakości środka transportu. Zaproponowany w pracy [25] wskaźnik ε jest bezwymiarowym współczynnikiem jednostkowej siły napędowej w postaci:

$$\varepsilon = \frac{P}{V \cdot W}, \quad (1.1)$$

gdzie:

- P – moc napędowa środka transportu (w tym przypadku statku),
- V – prędkość ruchu (w tym przypadku prędkość statku),
- W – całkowity (łącznie z ładunkiem) ciężar środka transportowego.

Przeprowadzone analizy [86] wykazały, że ogromny postęp techniczny w małym stopniu wpłynął na poprawę wskaźnika ze wzoru (1.1) dla współczesnych środków transportowych.

Współczynnik ε jest związany ze sprawnością energetyczną środka transportowego, którą można przedstawić dwojako:

1. Jako sprawność transportową T_E :

$$T_E = \frac{W \cdot s}{E} = \frac{W \cdot V}{P} = \frac{1}{\varepsilon}, \quad (1.2)$$

gdzie:

s – droga transportowanego ciężaru W ,

E – energia zużyta do transportu.

Sprawność transportowa T_E jest w tym przypadku odwrotnością współczynnika jednostkowej siły napędowej ε .

2. Jako sprawność napędową środka transportu η_T :

$$\eta_T = \frac{R \cdot V}{P}, \quad (1.3)$$

gdzie R jest oporem jaki stawia środowisko środkowi transportu, poruszającemu się z prędkością V .

W przypadku statku iloczyn $R \cdot V$ jest mocą holowania oznaczoną P_E , a P będzie mocą napędu (np. silnika głównego). Na statku moc silnika napędowego jest przenoszona przez przekładnię (o ile jest zastosowana), linię wałów na śrubę napędową, która jest tutaj elementem wykonawczym, generującą niezbędną do ruchu statku siłę naporu T .

Można więc zapisać, że:

$$\eta_T = \eta_M \cdot \eta_D, \quad (1.4)$$

gdzie:

η_M – sprawność części mechanicznej układu przeniesienia mocy statku,

η_D – sprawność części hydrodynamicznej (pędnika pracującego za kadłubem statku).

W przypadku statku stosowane są następujące zależności:

$$\eta_T = \eta - \text{ogólna sprawność napędowa}, \quad (1.5)$$

$$\eta_M = \eta_G \cdot \eta_S, \quad (1.6)$$

$$\eta_D = \eta_{HT} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{RT}, \quad (1.7)$$

gdzie:

η_G – sprawność przekładni (o ile jest zastosowana),

η_S – sprawność linii wałów,

η_{HT} – „sprawność” kadłuba,

η_{RT} – „sprawność” rotacyjna,

η_0 – sprawność pędnika odosobnionego (śruby napędowej pracującej bez kadłuba).

Uwzględniając powyższe wyrażenia, sprawność transportową można przedstawić jako:

$$T_E = \frac{W}{R} \cdot \eta_M \cdot \eta_D. \quad (1.8)$$

Sprawność transportowa w postaci (1.8) nie jest zbyt dobrą miarą dla statku, bo w skrajnym przypadku mogłaby doprowadzić do maksymalizacji ciężaru statku pustego, ponieważ ciężar W jest równy:

$$W = W_S + W_P + W_{Zap}, \quad (1.9)$$

gdzie:

W_S – ciężar statku pustego,

W_P – ciężar ładunku transportowanego,

W_{Zap} – ciężar niezbędnych zapasów aby statek mógł spełniać swoją funkcję.

Ciężar statku pustego i zapasów ma wpływ na koszty eksploatacji statku, natomiast ciężar ładunku, za który armator dostaje zapłatę, związany jest z zyskiem. Stąd bardziej przydatna postać sprawności transportowej odniesiona tylko do ładunku jest następująca:

– dla ładunku bez zapasów:

$$T_{EL} = \frac{W_P}{R} \cdot \eta_M \cdot \eta_D, \quad (1.10)$$

– lub ładunku z zapasami:

$$T_{EL} = \frac{V \cdot P_N}{P}, \quad (1.11)$$

gdzie P_N jest nośnością statku (zawierającą również ciężar zapasów).

W przypadku kontenerowców wskaźnik (1.10) jest stosowany w postaci:

$$T_{EL} = \frac{V \cdot TEU}{P}, \quad (1.12)$$

gdzie TEU jest liczbą kontenerów przeliczoną na kontenery jednostkowe.

Na podstawie sprawności transportowej, do oceny projektu statku proponuje się także inny wskaźnik dotyczący wartości statku SMF [30] w postaci:

$$SMF = \frac{k \cdot W_P \cdot V}{AAC}, \quad (1.13)$$

gdzie:

k – współczynnik eksploatacyjny, ustalany doświadczalnie na podstawie konkretnych typów statków,

AAC – średnie roczne nakłady eksploatacyjne.

1.3.2. Projektowy wskaźnik sprawności energetycznej EEDI

Dążenie do ograniczenia emisji tzw. gazów cieplarnianych, a w tym CO_2 , spowodowało wprowadzenie nowych kryteriów i norm, m.in. w projektowaniu silników spalinowych lub też

kompletnych środków transportowych. Także dla morskich środków transportowych (statków) Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) opracowała projektowy wskaźnik efektywności energetycznej (EEDI), który obowiązuje od 2013 roku dla nowo projektowanych i budowanych statków. Wskaźnik ten ogólnie, w dokumentach IMO [49], definiuje się jako:

$$EEDI = \frac{\text{CO}_2 \text{ emission}}{\text{transport work}} \quad (1.14)$$

i wyraża emisję CO₂ w gramach/1 tonomile transportowanego ładunku.

Wprowadzenie tego wskaźnika ma wymusić takie projektowanie i eksploatację statku (w tym i jego napędu), aby ograniczać emisję CO₂ (redukcja CO₂ w latach następnych będzie coraz większa).

Wprawdzie nadrzędnym celem wskaźnika EEDI jest ograniczenie emisji CO₂, to struktura tego wskaźnika pozwala na wykorzystanie go, jako kolejnego kryterium w projektowaniu, a także jako pewnego rodzaju miarę efektywności transportowej. Prawidłowe wykorzystanie wskaźnika EEDI w procesie projektowania statku może, z jednej strony, zredukować emisję CO₂, a z drugiej – prowadzić do optymalnego doboru parametrów techniczno-eksploatacyjnych statku ze względu na koszty eksploatacji statku ponoszone przez armatora.

Prace nad wskaźnikiem EEDI trwały już od dłuższego czasu. Punktem wyjścia było założenie, że transport ładunku drogą morską jest też związany z emisją CO₂. W dokumencie IMO [88] wskaźnik ten został przedstawiony w postaci:

$$\text{Attained design CO}_2 \text{ index} = \frac{C_F \cdot SFC \cdot P}{\text{Capacity} \cdot V_{ref}}, \quad (1.15)$$

gdzie:

C_F – poziom emisji CO₂ dla danego rodzaj paliwa,

SFC – jednostkowe zużycie paliwa przez silnik napędowy statku,

P – 75% wartości znamionowej zainstalowanej mocy silnika napędowego,

Capacity – nośność statku,

V_{ref} – prędkość statku dla zadanej nośności, na wodzie spokojnej.

Początkowy wzór (1.15) był rozbudowywany i uzupełniany o dodatkowe współczynniki. Łącznie było kilkanaście poprawek i uzupełnień. Aktualna wersja, przeznaczona do dalszych badań i analiz oraz zalecana do stosowania w projektowaniu statków w dokumencie IMO [49], ma postać:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE}) + \left(\prod_{j=1}^M f_j \left(\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} SFC_{AE} \right)}{f_i \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w}, \quad (1.16)$$

gdzie:

$C_{FME(i)}$ – bezwymiarowy współczynnik przetwarzania między zużyciem paliwa, określonym w gramach, oraz emisją CO₂, również mierzoną w gramach na podstawie zawartości węgla [49],

- $SFC_{ME(i)}$ – jednostkowe zużycie paliwa silnika głównego (silników), zapisane w certyfikacie EIAPP dla danego silnika,
- $P_{ME(i)}$ – 75% maksymalnej mocy ciągłej (MCR) silnika(ów) głównego,
- C_{FAE} – bezwymiarowy współczynnik przetwarzania, taki jak $C_{FME(i)}$ odnoszący się do mocy urządzeń pomocniczych,
- SFC_{AE} – jednostkowe zużycie paliwa silnika pomocniczego,
- P_{AE} – moc urządzeń pomocniczych, Międzynarodowa Organizacja Morska w dokumencie MEPC [27] określa ją odrębnie według mocy MCR dla statków o mocy do 10 tys. kW i powyżej 10 tys. kW,
- $P_{PTI(i)}$ – 75% zapotrzebowanej mocy prądnicy wałowej,
- $P_{AEff(i)}$ – moc elektryczna odzyskiwana z ciepła odpadowego przy $P_{ME(i)}$,
- $f_{eff(i)}$ – współczynnik innowacji (przy zastosowaniu energetycznych urządzeń innowacyjnych),
- $P_{eff(i)}$ – zmniejszenie mocy silnika głównego z powodu zastosowania urządzeń innowacyjnych,
- V_{ref} – prędkość statku w warunkach prób na mili pomiarowej dla maksymalnego dopuszczalnego przepisami stanu załadowania, uzyskanego z zatwierdzonej informacji o stateczności,
- Capacity – nośność dla wszystkich typów statków transportowych lub pojemność brutto dla statków pasażerskich,
- f_i – współczynnik odnoszący się do Capacity, jeżeli w jakiś sposób normatywnie jest ograniczona nośność lub pojemność brutto,
- f_w – bezwymiarowy współczynnik określający ogólnie spadek prędkości statku wskutek warunków pogodowych: fali i wiatru,
- f_j – ogólna poprawka na szczególną specyfikę projektu statku (np. klasa lodowa statku).

Wzór na EEDI opracowano głównie dla napędów spalinowych i nie musi być stosowany do napędów: spalinowo-elektrycznych, turbinowych lub hybrydowych (przewiduje się, że w latach następnych może być zastosowany także dla tych rodzajów napędów).

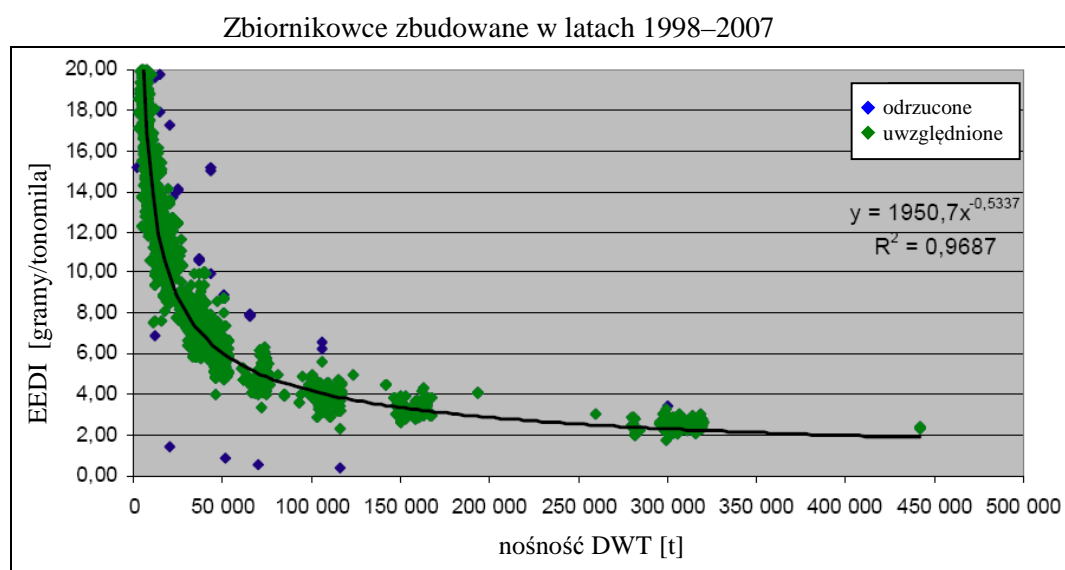
Wzór na EEDI ma dość złożoną strukturę, ale można wyróżnić dwie podstawowe grupy parametrów:

- dotyczących siłowni okrętowej, czyli moc silnika(ów) głównego i pomocniczego, jednostkowe zużycie paliwa, współczynniki przeliczające zużycie paliwa na emisję CO₂, moc urządzeń wykorzystujących ciepło odpadowe, parametry określające zastosowanie i wykorzystanie innowacyjnych urządzeń – parametry te są zawarte w liczniku wzoru (1.16);
- eksploatacyjnych statku, tj. nośność, prędkość na wodzie spokojnej, spadek prędkości w rzeczywistych warunkach pogodowych – przedstawiono w mianowniku wzoru (1.16) oraz parametr z licznika wzoru (1.16) określający typ i specyficzne warunki pracy, np. pływanie w lodach.

Aktualnie obowiązujący wzór na EEDI nie jest zapewne ostateczny, mimo że wprowadzono go już w 2013 roku. Cały czas trwa dyskusja oraz proponowane są różne zmiany, np. co do

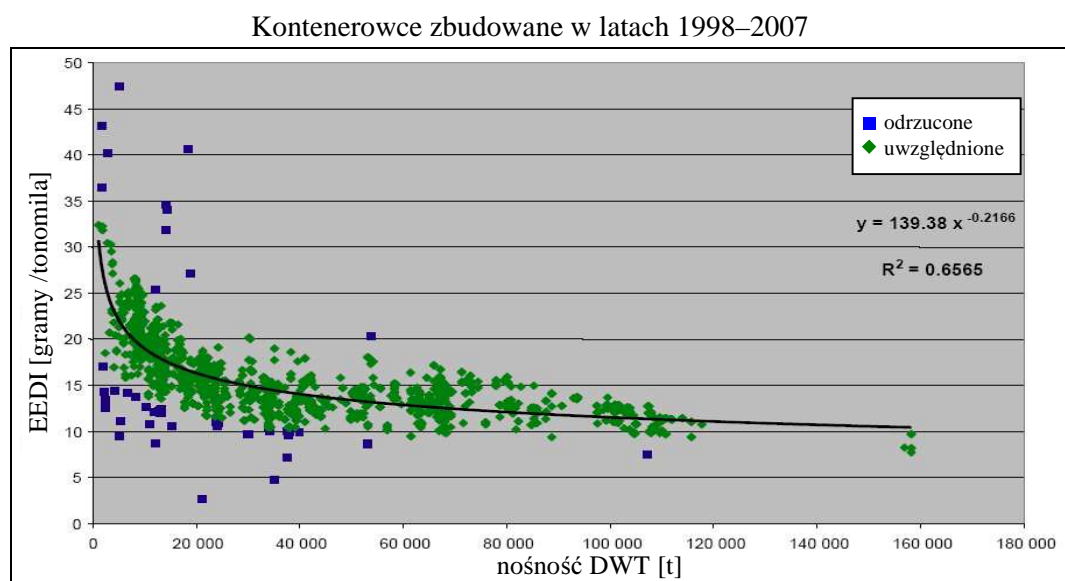
wartości lub sposobu obliczania niektórych wielkości (moc, prędkość, nośność) lub też współczynników (np. spadek prędkości statku podczas pływania po sfalowanej wodzie).

Aby ustalić oczekiwaną redukcję CO₂, opracowano linie referencyjne dla różnych wielkości i typów statków – rysunki 1.1–1.3 [27]. Linie referencyjne opracowano na podstawie analizy regresyjnej obliczonych wskaźników EEDI dla wcześniej zbudowanych i eksploatowanych statków. Na przedstawionych wykresach (rys. 1.1–1.3) widać, że część aktualnie eksploatowanych statków ma większą emisję CO₂ niż przewiduje to norma na 2013 rok. Dla każdego nowego statku będą wykonywane obliczenia wskaźnika EEDI i porównywane z odpowiednią dla tego statku linią referencyjną. Jeżeli wartość EEDI będzie mniejsza lub równa wartości wynikającej z linii referencyjnej, to taki statek uzyska certyfikat efektywności energetycznej i będzie dopuszczony do eksploatacji.



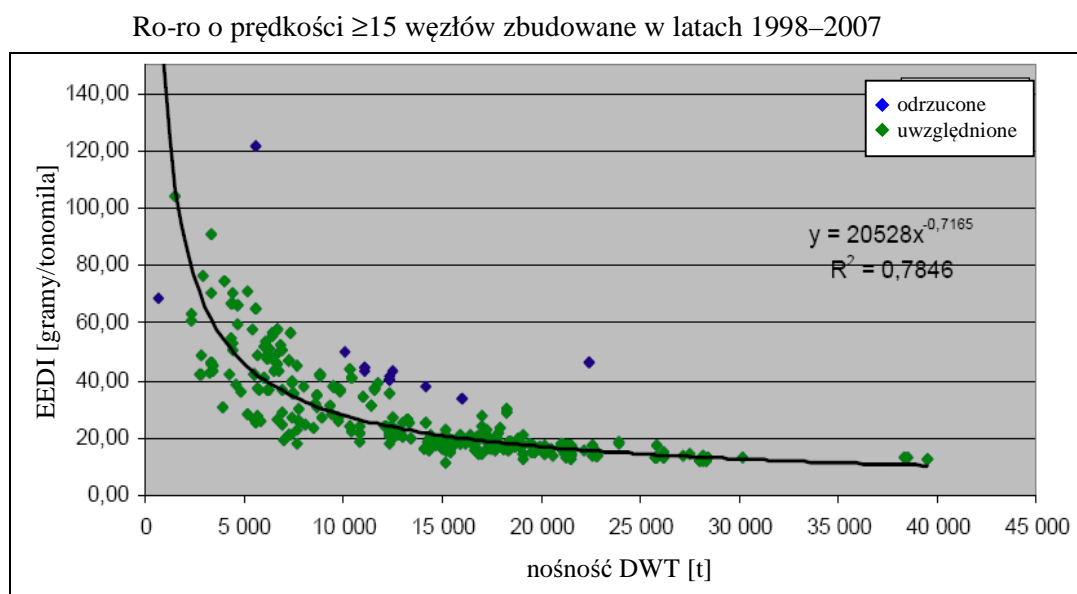
Rys. 1.1. Linia referencyjna dla zbiornikowców

Źródło: [27].



Rys. 1.2. Linia referencyjna dla kontenerowców

Źródło: [27].



Rys. 1.3. Linia referencyjna dla statków typu ro-ro

Źródło: [27].

Wskaźnik EEDI ma więc bardzo duży wpływ na projektowanie statku, ponieważ w swojej strukturze (1.16) zawiera dwa podstawowe parametry projektowe: nośność i prędkość eksploatacyjną, która zależy od prędkości kontraktowej V i spadku prędkości ΔV na linii żeglugaowej. Występująca we wzorze moc silnika i inne parametry związane z napędem też zależą od nośności i prędkości statku.

Aby ułatwić ocenę EEDI dla nowego statku i stwierdzić czy spełnia on normy emisji CO_2 , linię referencyjną także aproksymowano wyrażeniem [50]:

$$L_{ref} = a \cdot b^{(-c)}, \quad (1.17)$$

gdzie a, b, c są parametrami, których wartości dla poszczególnych typów statków zawarto w dokumencie IMO [50].

Ponieważ w latach następnych będą dokonywane kolejne redukcje emisji CO_2 , stąd linia referencyjna także będzie zmieniać swoją wartość [50].

1.3.3. Wskaźniki ekonomiczne stosowane do oceny jakości projektu statku

Efektywność ekonomiczna statku, jak i każdego innego przedsięwzięcia gospodarczego, jest określana w sposób ścisły, bo tylko tak można wspomagać podjęte przez armatora decyzje o typie, wielkości i innych parametrach zlecanego do budowy statku. Jednym z takich wskaźników, opisującym związki pomiędzy niezależnymi projektowymi parametrami statku, jest wskaźnik zwrotu kapitału CRF :

$$CRF = \frac{R - AAC}{I}, \quad (1.18)$$

gdzie:

R – roczne dochody z eksploatacji statku,

AAC – roczne koszty,
 I – koszt inwestycji.

Gdy nie znamy dochodu z eksploatacji, np. nowego zamawianego statku, to zakładając, że ten dochód będzie taki sam dla wszystkich analizowanych wariantów projektowanego statku, wtedy można stosować kryterium średnich rocznych nakładów eksploatacyjnych AAC :

$$AAC = CC + RC + VC \cdot RTPA, \quad (1.19)$$

gdzie:

CC – koszt kapitału,
 RC – koszt utrzymania statku,
 VC – koszt rejsu statku,
 $RTPA$ – liczba rejsów w ciągu roku.

Koszt rejsu statku VC obejmuje m.in. koszt paliwa, a koszt paliwa jest związany z mocą napędu P i prędkością statku V , natomiast liczba rejsów w ciągu roku $RTPA$ jest także uzależniona od prędkości statku V .

2. PRZEDMIOT I CEL PROWADZONYCH BADAŃ

2.1. Problem badawczy

Celem projektowania, jak to przedstawiono w rozdziale 1.2, jest opracowanie projektu statku o takich parametrach, przy których armator będzie mógł osiągać maksymalne zyski z eksploatacji statku. Gdyby statek był eksploatowany w stałych (niezmiennych w czasie) warunkach pogodowych, najlepiej na spokojnej wodzie (bez wiatru i falowania), to poszukiwanie optymalnych parametrów projektowych (przy których można byłoby osiągnąć maksymalny zysk) byłoby znacznie prostszym zadaniem. Statek jednak jest eksploatowany w bardzo zmiennych warunkach pogodowych, czasami w skrajnie trudnych i niebezpiecznych dla statku, załogi oraz przewożonego ładunku. Stąd też koszty eksploatacji statku, od których zależy zysk armatora, są zmienne i w dużym stopniu zależą od warunków pogodowych w jakich jest on eksploatowany.

W procesie projektowania statku pojawiają się więc pytania:

- Jakimi parametrami projektowo-eksploatacyjnymi ma charakteryzować się statek i w jakim stopniu wpłyną na nie warunki pogodowe w jakich będzie eksploatowany statek?
- Jakie elementy środowiska morskiego i jakie parametry tych elementów będą miały wpływ na projektowanie statku, a później po zbudowaniu na jego eksploatację?
- Jak uwzględnić w procesie projektowania oraz eksploatacji warunki pogodowe występujące na trasach żeglugi?
- Jak powinny wyglądać (być przedstawione) związki, np. matematyczne, pomiędzy parametrami projektowo-eksploatacyjnymi statku transportowego a parametrami elementów środowiska morskiego, w których eksploatowany jest statek?

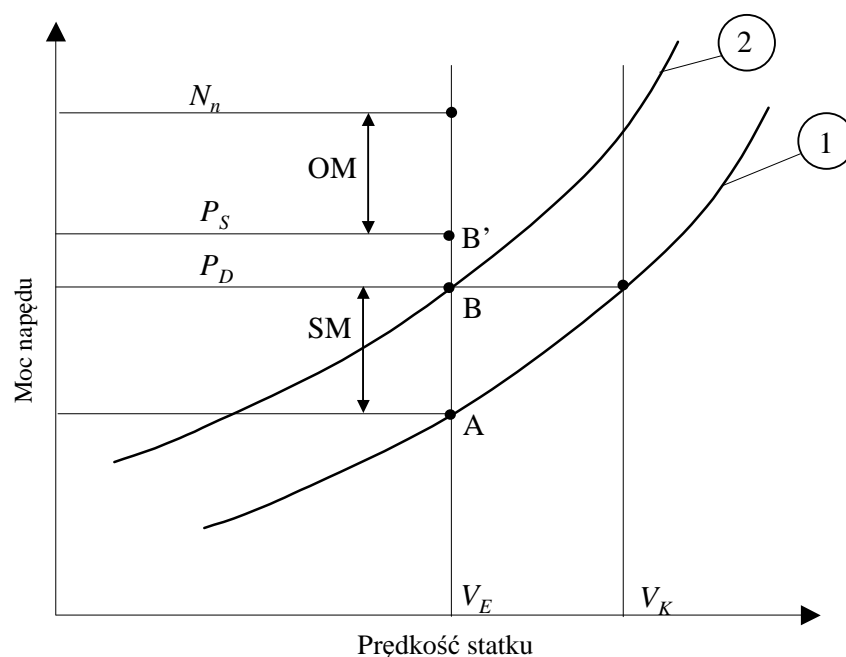
Jest wiele parametrów projektowych, które decydują o optymalnym rozwiązaniu czy jakości zaprojektowanego statku. Większość z nich związana jest z geometrią kadłuba statku i jego charakterystycznymi wymiarami. Po zbudowaniu statku, jego przyszła eksploatacja i warunki pogodowe w jakich będzie pływał nie mają już wpływu na parametry ustalone na etapie projektowania. Odpowiedź na powyższe pytania musi być znana podczas projektowania statku i najlepiej we wstępnych jego etapach.

Wśród parametrów charakteryzujących statek jest parametr, który jest bardzo istotny jako parametr projektowy i jednocześnie eksploatacyjny – jest nim prędkość statku. Z prędkością statku wiąże się też zużycie paliwa, czas rejsu, a biorąc pod uwagę bezpieczeństwo statku, także trasa żeglugi. Prędkość statku, a także pozostałe wymienione parametry eksploatacyjne statku są w dużym stopniu uzależnione od warunków pogodowych występujących na akwenach morskich, przez które przebiegają trasy żeglugi.

W tradycyjnym projektowaniu prędkość statku jest jednym z głównych parametrów zakładanych przez armatora przy składaniu zamówienia na nowy statek. W nowym podejściu do projektowania, którego celem jest maksymalizacja zysku armatora, prędkość statku będzie wynikiem przeprowadzonego procesu optymalizacji. Aby uzyskać doskonały projekt statku stosowane są odpowiednie miary. Prędkość statku występuje w sposób jawny prawie we

wszystkich miarach stosowanych do oceny jakości projektowanego statku. Jest w sprawności transportowej T_E – wzór (1.2) lub (1.11) i (1.12), sprawności napędowej η_T – wzór (1.3), wskaźniku wartości statku – wzór (1.13), w projektowym wskaźniku sprawności energetycznej IMO – wzór (1.16). Jedynie we wskaźniku ekonomicznym CRF – wzór (1.18) – nie występuje w postaci jawnej, ale ponieważ roczne koszty eksploatacji statku AAC – wzór (1.19) – zależą m.in. od kosztów paliwa, a zużycie paliwa zależy m.in. od prędkości eksploatacyjnej statku, to także ta miara jest uzależniona w sposób pośredni od prędkości statku. Ponieważ statek jest eksploatowany na akwenach morskich, na których najczęściej występują zmienne warunki pogodowe, to prędkość z jaką będzie eksploatowany statek będzie zależała od tych warunków pogodowych.

Zdefiniowanego, postawionymi pytaniami, problemu badawczego dotychczas nie rozwiązano w formie przydatnej do procesu projektowania z zastosowaniem metod optymalnych. Szczególnie to stwierdzenie dotyczy nowego podejścia w projektowaniu, w którym prędkość statku oraz nośność mają być wynikiem optymalnym, który zmaksymalizuje zysk armatora z eksploatacji statku. W tradycyjnym projektowaniu, w którym armator zakłada prędkość statku, problem wpływu warunków pogodowych jest uwzględniony w sposób bardzo przybliżony, w postaci tzw. dodatku żeglugowego (rys. 2.1).



Objaśnienia: N_n – moc nominalna silnika, P_s – moc na linii wałów (punkt B'), P_D – moc dostarczona do stożka śruby, B – projektowy punkt pracy śruby napędowej, A – punkt pracy śruby na wodzie spokojnej, czysty kadłub, V_K – prędkość kontraktowa, V_E – oczekiwana prędkość eksploatacyjna;

- ① – charakterystyka śrubowa na wodzie spokojnej, czysty kadłub,
- ② – charakterystyka śrubowa z dodatkiem żeglugowym.

Rys. 2.1. Położenie projektowego punktu pracy śruby napędowej w stosunku do mocy nominalnej silnika

Źródło: opracowanie własne.

Różnica pomiędzy N_n a punktem B' jest zapasem mocy lub zapasem operacyjnym (EM lub OM), wynoszącym 10% mocy nominalnej silnika (zapas ten jest przeznaczony przez armatorów m.in. na odrobienie ewentualnych opóźnień wynikłych na trasie żeglugi). Wartość mocy wynikająca z różnicy pomiędzy punktami B i A jest definiowana jako dodatek żeglugowy (SM). Położenie punktu B jest zdeterminowane zapisami w kontrakcie pomiędzy stoczną a armatorem statku. Stąd dodatek żeglugowy nie ma wartości stałej i może wynosić od 5% do 20% oporu na wodzie spokojnej. Różnica mocy pomiędzy punktem B' i B wynika ze sprawności linii wałów.

Standardowo, w czasie projektowania statku, przyjmuje się dodatek żeglugowy w wysokości 15%. Na niektórych liniach żeglugowych dla określonego typu statku (masowiec, zbiornikowiec, kontenerowiec) ten dodatek może być za mały, a na innych za duży. Wyniki takich badań przedstawione są w pracach [97–99, 107, 108]. Należy jeszcze pamiętać, że we wzorze na wskaźnik EEDI (1.16) jest moc silnika głównego $P_{ME(i)}$ wynosząca 75% maksymalnej mocy ciągłej (MCR – na rys. 2.1 jest to N_n). Oznacza to, że określenie mocy napędu statku, która zapewni uzyskanie prędkości eksploatacyjnej statku, jest z wielu względów, czasami sprzecznych wymagań, bardzo ważne.

2.2. Przedmiot badań – prędkość eksploatacyjna statku

Na podstawie zdefiniowanego w rozdziale 2.1 problemu badawczego można określić przedmiot badań, którym będą matematyczne zależności pomiędzy prędkością eksploatacyjną statku a parametrami geometrycznymi projektowanego statku i parametrami pogodowymi, w których statek będzie eksploatowany. Związki te opracowano w formie, która pozwala projektować statek zgodnie z nową metodologią, a jej kryterium są maksymalne zyski armatora w sensie średnim statystycznym; weryfikacja (ocena) tak wykonanego projektu może być dokonywana za pomocą miar przedstawionych w rozdziale 1.3.

Gdyby statek płynął na spokojnej wodzie – brak wiatru, falowania i ewentualnie prądów powierzchniowych – to związek pomiędzy prędkością statku a parametrami pogodowymi a parametrami geometrycznymi projektowanego statku byłby oczywisty i prosty. Taki związek daje zależność oporu statku na wodzie spokojnej w funkcji prędkości. Jest on wykorzystywany w tradycyjnym projektowaniu statku do określania mocy holowania i sprawności transportowej – wzór (1.3) – ale tylko na wodzie spokojnej. Nie pozwala jednak na prowadzenie optymalizacji parametrów projektowych (głównie geometrycznych) statku pływającego po sfalowanej wodzie. Stąd też w tradycyjnym projektowaniu jedyną, w pełni zdefiniowaną i weryfikowalną prędkością jest prędkość statku na wodzie spokojnej (prędkość ta występuje także we wzorze na EEDI (1.16) jako V_{ref}) nazywana też prędkością kontraktową, ponieważ jest zapisana w kontrakcie na budowę statku.

Prędkość kontraktowa jest to prędkość, jaką statek powinien osiągnąć w warunkach kontraktowych dotyczących: pogody (siła wiatru, stan morza, temperatura wody), stanu powierzchni kadłuba i śruby napędowej oraz stanu załadowania (zanurzenia) statku, w którym statek wykorzystuje określoną moc, przy określonych obrotach silnika (śruby) [52, 90]. Prędkość

kość kontraktowa jest rygorystycznie egzekwowanym warunkiem kontraktowym po zbudowaniu statku, na podstawie prób prędkości na mili pomiarowej (warunki prób na mili pomiarowej są jednoznacznie określone, a sama prędkość jest łatwo mierzalna). Najczęściej próby na mili pomiarowej są wykonywane dla balastowego zanurzenia statku, więc wyniki pomiarów są wtedy przeliczane na warunki kontraktowe [52].

Statek najczęściej jednak pływa w warunkach innych niż kontraktowe (dotyczy to szczególnie warunków pogodowych). W rzeczywistych warunkach pogodowych statek będzie pływał z określoną prędkością eksploatacyjną.

Rzeczywiste warunki pogodowe mogą być:

- takie jak występują podczas konkretnego rejsu statku na konkretnej linii żeglugowej; takie warunki pogodowe podawane są w np. 4-godzinnych serwisach pogodowych (rozdz. 12.4.3),
- jako średnie statystyczne długoterminowe, często nazywane sezonowymi warunkami pogodowymi (rozdz. 4).

Prędkość eksploatacyjna jest to prędkość z jaką może płynąć statek w rzeczywistych warunkach pogodowych, przy rzeczywistym stanie powierzchni kadłuba i śruby, przy rzeczywistym stanie załadunku (zanurzenia – najczęściej konstrukcyjnego), wykorzystując dostępną moc silnika napędowego.

Prędkość eksploatacyjna może być **chwilowa**, czyli taka jaka wynika z zadanych chwilowych warunków pogodowych (mogą one pochodzić z prognoz krótko- lub długoterminowych) w jakich płynie statek. Ponieważ parametry pogodowe są wielkościami losowymi, rozpatrywana może być **prędkość eksploatacyjna** jako wielkość **losowa**, dla której można określić **średnią wartość statystyczną o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia**. Przy określaniu **średniej prędkości statystycznej** dla armatora najbardziej interesująca może być **prędkość długoterminowa**, np. dla jednego roku eksploatacji statku na określonej linii lub liniach żeglugowych.

Mimo że aktualnie w kontraktach na budowę statku zapisana jest prędkość kontraktowa, która w prosty sposób jest weryfikowana, to o efektach ekonomicznych będzie decydować średnia statystyczna prędkość eksploatacyjna. W tradycyjnym projektowaniu prędkość eksploatacyjna jest określana w sposób bardzo przybliżony na podstawie zakładanego dodatku żeglugowego – rysunek 2.1. Takie podejście jest jednak zbyt mało dokładne, a ponadto brak jest związku tej prędkości z konkretnymi parametrami pogodowymi występującymi podczas eksploatacji statku, a także brak jest związków z parametrami geometrycznymi projektowanego statku. Pierwsze wyniki określania prędkości eksploatacyjnej statku na linii żeglugowej, na której występują określone średnie statystyczne długoterminowe parametry pogodowe, przedstawiono w pracach [92–99]. W tych publikacjach nie przedstawiono jednak zależności matematycznych pomiędzy prędkością eksploatacyjną a parametrami pogodowymi i parametrami geometrycznymi projektowanego statku.

2.3. Cel badań i tezy

Przy określeniu celu badań należy wziąć pod uwagę następujące przesłanki:

- projektowanie statku zgodnie z nową metodologią, której kryterium jest maksymalizacja zysku armatora, wymaga znajomości, już na etapie projektowania wstępnego, matematycznego modelu prędkości eksploatacyjnej statku w statystycznych warunkach pogodowych;
- dopuszczenie nowego statku do eksploatacji wymaga spełnienia różnych kryteriów, m.in. związanych z emisją CO₂, czyli spełnienie wskaźnika EEDI, w którym jednym z ważniejszych parametrów jest prędkość statku;
- optymalizacja trasy żeglugi statku w warunkach zmiennych parametrów pogodowych wymaga znajomości charakterystyki prędkościowej statku przy oddziaływaniu fali, wiatru i ewentualnie powierzchniowych prądów morskich;
- brak jest wystarczająco dokładnego modelu prędkości eksploatacyjnej statku uzależnionego tylko od podstawowych parametrów geometrycznych statku i parametrów pogodowych.

Celem badań jest: *opracowanie metody wyznaczania średniej długoterminowej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego przydatnej w projektowaniu wstępnym.*

Realizacja tak sformułowanego celu badań wymaga postawienia określonych pytań problemowych i problemów szczegółowych (tezy) takich jak:

- zbadanie jakie właściwości (elementy) statku mają wpływ na prędkość eksploatacyjną;
- jakimi parametrami geometrycznymi (projektowymi) dysponuje projektant statku na etapie wstępnym, wtedy gdy zapadają najważniejsze decyzje dotyczące np. wielkości statku;
- zbadanie jakimi funkcjami (algorytmami) można, z wystarczającą dokładnością, aproksymować poszczególne elementy charakterystyk oporowo-napędowych, wykorzystując podstawowe parametry geometryczne statku;
- zbadanie, czy poszczególne elementarne aproksymacje pozwalają na opracowanie matematycznego modelu prędkości eksploatacyjnej statku, uzależnionej tylko od podstawowych parametrów projektowych;
- zbadanie, czy otrzymana dokładność modelu aproksymacyjnego będzie wystarczająca do dalszych zadań wynikających z procesu projektowania;
- zbadanie, czy dostępne są średnie, statystyczne, długoterminowe parametry opisujące warunki pogodowe występujące na liniach żeglugowych, w formie przydatnej do obliczeń prędkości eksploatacyjnej statku;
- zbadanie, czy opracowany model prędkości eksploatacyjnej będzie mógł być zastosowany do opracowania metody wyznaczania średniej, statystycznej prędkości eksploatacyjnej nowo projektowanego statku na zadanej linii żeglugowej (średnie sezonowe warunki pogodowe);
- zbadanie, czy opracowana metoda będzie mogła być zastosowana w modelu optymalizacyjnym prędkości i nośności statku na etapie projektowania wstępnego.

Wyjaśnienie lub rozwiązanie szczegółowych problemów pozwoli odpowiedzieć na pytanie czy sformułowany cel badań został osiągnięty.

3. KONCEPCJA, HIPOTEZY I ZAKRES REALIZACJI BADAŃ

3.1. Wstęp

W rozdziale 2. uzasadniono, że w projektowaniu prędkość eksploatacyjna statku transportowego obliczana dla średnich statystycznych parametrów pogodowych jest, oprócz nośności statku, najważniejszym parametrem decydującym o efektach ekonomicznych zbudowanego statku. Prędkość ta ma też wpływ na różne dodatkowe wskaźniki, np. na wskaźnik efektywności energetycznej statku (EEDI) – nieprzekroczenie wartości liczbowej tego wskaźnika dla danego statku jest warunkiem dopuszczenia go do eksploatacji.

Statek może pływać na różnych liniach żeglugowych, które przebiegają przez rozmaite akweny (rys. 4.1 i 4.2, rozdz. 4.). Na tych akwenach występują zjawiska pogodowe, głównie wiatr i falowanie, dla których wartości liczbowe parametrów falowania i wiatrów występują z różnorakim prawdopodobieństwem. To prawdopodobieństwo jest też różne w zależności od pory roku (przykłady danych statystycznych falowania przedstawiono w tabeli 4.2 oraz 4.4). Aby więc określić średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną, należy opracować model matematyczny i obliczyć chwilową prędkość eksploatacyjną jaką statek będzie osiągał w określonej porze roku, na określonym akwenie, płynąc określonym kursem względem średnich statystycznych, krótkoterminowych kierunków wiatru i falowania. Przy obliczaniu chwilowej prędkości eksploatacyjnej statku należy uwzględnić także inne elementy środowiska morskiego, np. powierzchniowy prąd morski, którego parametry, ze względu na zbyt małą zmienność w czasie, będzie można traktować jako zdeterminowane.

3.2. Prędkość eksploatacyjna statku w rzeczywistych warunkach pogodowych

Zakładając, że lokalne zmiany prędkości statku, wynikające np. z kołysań statku na fali lub zmian parametrów pogodowych, są pomijalnie małe, to chwilową prędkość eksploatacyjną statek osiąga, gdy jego całkowity opór R_C jest równoważony naporem śruby T_S pracującej za kadłubem:

$$R_C(P_P, P_G) = T_S(P_{GS}, P_P, P_{SN})(1-t), \quad (3.1)$$

gdzie:

- P_P – parametry pogodowe,
- P_G – parametry geometryczne kadłuba statku,
- P_{GS} – parametry geometryczne śruby napędowej,
- P_{SN} – parametry silnika napędowego,
- t – współczynnik ssania, który uwzględnia wpływ śruby napędowej na dodatkowy opór kadłuba statku.

Aby wyznaczyć prędkość statku, jaką może uzyskać przy określonej sile naporu T_S śruby napędowej, należy znać całkowity opór R_C , który wystąpi podczas pływania statku w określonych warunkach pogodowych.

Jak widać z równości (3.1), parametry pogodowe, w jakich jest eksploatowany statek, mają wpływ nie tylko na jego całkowity opór, ale także na napór śruby napędowej. Duże kołysania i wynikające z nich ruchy względne, wywołane falowaniem, będą powodowały m.in. wynurzenie się śruby napędowej i spadek jej naporu, co w konsekwencji spowoduje także spadek prędkości statku.

Opór statku w rzeczywistych warunkach pogodowych

Do wyznaczenia prędkości eksploatacyjnej statku w rzeczywistych warunkach pogodowych przyjęto, że całkowity opór statku jest równy:

$$R_C = R + \Delta R, \quad (3.2)$$

gdzie:

R – opór statku na wodzie spokojnej,

ΔR – dodatkowy opór statku pochodzący od oddziaływania wiatru i fali oraz od urządzeń sterowych:

$$\Delta R = R_A + R_{CV} + R_W + R_R, \quad (3.3)$$

gdzie:

R_A – dodatkowy opór od wiatru,

R_{CV} – dodatkowy opór od morskich prądów powierzchniowych,

R_W – dodatkowy opór od falowania,

R_R – dodatkowy opór np. od urządzeń sterowych utrzymujących statek na zadanym kursie (zakłócenia kursu są też wywołane oddziaływaniem wiatru i fali).

Napór śruby okrętowej w rzeczywistych warunkach pogodowych

Występujący po prawej stronie równości (3.1) napór śruby pracującej za kadłubem statku wynika z:

- geometrii skrzydeł, jak i z wymiarów całej śruby;
- prędkości statku, na którą mają wpływ parametry pogodowe;
- z kołysań statku i wynikających z nich pionowych ruchów względnych (w złych warunkach pogodowych śruba może się wynurzać, co będzie powodowało spadek jej naporu);
- parametrów silnika napędowego (głównie z jego pola pracy uzależnionego od mocy nominalnej i nominalnej prędkości obrotowej) – pod wpływem warunków pogodowych, gdy będzie wzrastał opór statku, mimo kryterium utrzymania stałej prędkości i kursu statku, dostępna moc silnika dostarczana do śruby w postaci momentu obrotowego będzie się zmieniać, będzie zmniejszać się prędkość obrotowa silnika (śruby), a także prędkość statku.

Prędkość eksploatacyjna statku

Opracowując metody (modele) obliczania poszczególnych składników oporu całkowitego oraz naporu śruby, wynikających z warunków zewnętrznych i pola pracy silnika napędowego, rozwiązując równanie (3.1), można wyznaczyć **chwilową prędkość eksploatacyjną** statku. Przyjmując określoną linię żeglugową, dla której znane są średnie statystyczne parametry pogodowe oraz prawdopodobieństwo ich wystąpienia, można będzie wyznaczyć **średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną** statku na tej linii żeglugowej.

3.3. Koncepcja modelu prędkości eksploatacyjnej statku przydatna na etapie projektowania wstępnego

Wyznaczenie prędkości eksploatacyjnej statku transportowego, z założonym prawdopodobieństwem utrzymania na danej linii żeglugowej [72, 97–99], jest możliwe pod warunkiem, że znamy:

- pełną geometrię statku (linie teoretyczne kadłuba, krzywe hydrostatyczne, plan ogólny z nadbudówkami);
- pełną geometrię śruby napędowej, jej charakterystyki hydrodynamiczne oraz geometrię steru płetwowego;
- parametry eksploatacyjne silnika napędowego (moc i prędkość obrotowa, pole pracy silnika);
- statystyczne parametry falowania, wiatrów i powierzchniowych prądów morskich występujących na danej linii żeglugowej;
- wyniki basenowych badań modelowych napędu statku oraz wyniki prób morskich na mili pomiarowej dla zbudowanego statku.

Mając te wszystkie dane, które są dostępne wtedy, gdy statek jest zaprojektowany i wykonane są badania modelowe, można obliczyć średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną statku na wybranej linii żeglugowej – takie wyniki obliczeń prędkości eksploatacyjnej były już prezentowane w pracach [72, 97–103]. Aby jednak projektować optymalne dla danego zadania statki, stosując nową metodykę projektowania, przedstawioną w rozdziale 1.2, należy opracować model prędkości eksploatacyjnej statku zawierający tylko podstawowe parametry geometryczne, które są dostępne we wstępnym etapie projektowania.

Hipotezy i przyjęte założenia

Aby zrealizować postulowane badania i założony cel, przyjęto następujące hipotezy i założenia metodologiczne:

- Zakłada się, że zbudowana, na podstawie danych literaturowych, baza parametrów techniczno-eksploatacyjnych statków transportowych będzie wystarczająca do opracowania przybliżonych metod wyznaczania oporu całkowitego i mocy napędu.

– Zakłada się, że ograniczona liczba parametrów geometrycznych, którymi dysponuje projektant na etapie projektowania wstępnego, pozwoli na opracowanie, z wystarczającą dokładnością, przybliżonych metod wyznaczania oporu całkowitego i parametrów napędu statku transportowego.

– Zakłada się, że podział oporu całkowitego na wodzie spokojnej i na dodatkowe opory zgodnie z równaniami (3.2) i (3.3) pozwoli na indywidualny dobór metod aproksymacyjnych dla każdego składnika, co zapewni akceptowalną dokładność przy obliczaniu oporu całkowitego.

– Zakłada się, że ograniczona liczba parametrów dotycząca układu napędowego (silnik–śruba napędowa–kadłub) pozwoli na opracowanie metod aproksymacyjnych umożliwiających poszukiwanie punktu pracy układu napędowego w zmiennych warunkach pogodowych.

– Zakłada się, że dostępne dane dotyczące średnich statystycznych (sezonowych) parametrów pogodowych na liniach żeglugowych będą mogły być przystosowane do wykorzystania przy obliczaniu średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku.

Dla powyższych założeń sformułowano główne **hipotezy badawcze**:

– Opracowanie metod parametrycznych: całkowitego oporu statku w rzeczywistych warunkach pogodowych oraz napędu statku pozwoli na sformułowanie parametrycznych równań oporowo-napędowych, których rozwiązaniem będzie **chwilowa prędkość eksploatacyjna statku** dla założonych parametrów pogodowych.

– Wykorzystanie bazy zawierającej średnie statystyczne (sezonowe) parametry pogodowe, występujące na liniach żeglugowych w opracowanym parametrycznym modelu oporowo-napędowym, pozwoli na wyznaczenie z akceptowalną do projektowania wstępnego dokładnością **średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku** na zadanej linii żeglugowej.

Realizacja badań

Przyjęta w pracy koncepcja badawcza została zrealizowana w następującej kolejności:

– Opracowano bazę parametrów techniczno-eksploatacyjnych statków zawierającą wszystkie dane niezbędne do opracowania modeli parametrycznych całkowitego oporu i napędu statków transportowych oraz ich weryfikacji.

– Opracowano bazę średnich statystycznych parametrów pogodowych występujących na akwenach, przez które przebiegają linie żeglugowe, w formie przydatnej do prognozowania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego.

– Opracowano ogólne modele matematyczne do obliczania składników oporu całkowitego oraz naporu śruby okrętowej i mocy napędu dla statków transportowych – obliczane z tych modeli opór i moc napędu statku weryfikowano z badaniami modelowymi i z pomiarami na statkach zbudowanych (próby zdawczo-odbiorcze); **obliczenia te wykorzystano jako wartości „wzorcowe” do testowania merytorycznego opracowanych modeli parametrycznych.**

– Opracowano modele parametryczne całkowitego oporu i napędu, zawierające tylko podstawowe parametry geometryczne statku, którymi dysponuje projektant na etapie projektowania wstępnego.

- Przeprowadzono weryfikację statystyczną i merytoryczną opracowanych modeli parametrycznych – weryfikację merytoryczną prowadzono na podstawie obliczeń „wzorcowych” lub wyników badań modelowych.

- Obliczono, na podstawie opracowanych modeli parametrycznych i średnich statystycznych parametrów pogodowych, występujących na zadanej linii żeglugowej, średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną statku transportowego.

- Ostatecznie zweryfikowano obliczoną prędkość eksploatacyjną statku transportowego.

Rezultaty przedstawionej koncepcji badań pozwolą na wdrożenie nowej metodyki projektowania statków (rozdz. 1.2), odmiennej od dotychczas stosowanej. Wykorzystanie rezultatów badań – model parametryczny prędkości eksploatacyjnej statku transportowego w statystycznych warunkach pogodowych na zadanej linii żeglugowej – w nowej metodyce projektowania wstępnego statku pozwoli na lepsze projektowanie statków, których parametry techniczno-eksploatacyjne będą lepiej dostosowane do sytuacji rynkowej w transporcie morskim.

3.4. Bazy statków transportowych i ich parametry techniczno-eksploatacyjne

W celu opracowania uproszczonego modelu prędkości eksploatacyjnej statku transportowego przygotowano dwie bazy danych statków o różnych typach i wielkościach.

Baza A zawiera dane statków uzyskane z literatury, którą wykorzystano do określenia niezbędnych zależności statystycznych wielkości i parametrów wykorzystanych przy opracowaniu modelu prędkości eksploatacyjnej statku. Baza ta zawiera:

- parametry geometryczne kadłuba: długość L , szerokość B , zanurzenie T , wysokość boczna H , współczynnik pełnotliwości podwodzia C_B , współczynnik pełnotliwości owręża C_M , współczynnik pełnotliwości wzdłużnej C_P , współczynnik pełnotliwości wodnicy C_{WP} , wyporność ∇ ;

- powierzchnie kadłuba: podwodna i nadwodna łącznie z nadbudówkami;
- parametry śruby napędowej: średnica, liczba skrzydeł, współczynnik skoku i współczynnik powierzchni wyprostowanej;

- parametry steru płetwowego: typ steru, powierzchnia, wydłużenie i położenie;
- parametry silnika napędowego: typ silnika, moc nominalna i nominalna prędkość obrotowa;

- prędkość kontraktowa statku.

Parametry techniczno-eksploatacyjne statków w bazie A zebrane są dla czterech typów:

- kontenerowce (zakres wyporności od 12 420 m³ do 214 580 m³) – 56 statków,
- masowce (zakres wyporności od 9770 m³ do 288 000 m³) – 41 statków,
- zbiornikowce (zakres wyporności od 3945 m³ do 335 200 m³) – 32 statki,
- statki LNG (zakres wyporności od 7320 m³ do 170 320 m³) – 14 statków.

Baza B zawiera szczegółowe dane (linie teoretyczne, plan ogólny, krzywe hydrostatyczne, geometrię i charakterystyki śruby napędowej oraz steru płetwowego, dane dotyczące silnika napędowego, wyniki badań modelowych oporu i napędu, wyniki pomiarów prędkości na mili

pomiarowej) statków zbudowanych w Stoczni Szczecińskiej – siedem statków. Podstawowe parametry techniczno-eksploatacyjne statków z bazy B zamieszczono w tabeli 3.1. Bazę tę wykorzystano do testowania opracowanych aproksymacji, z których zbudowano model prędkości eksploatacyjnej statku, a także do dokładnych obliczeń parametrów ruchu statku na danej linii żeglugowej, na której występują określone statystyczne parametry pogodowe.

Tabela 3.1. Podstawowe parametry techniczno-eksploatacyjne statków z bazy B

Parametr	Statek masowiec			
	M1	M2	M3	M4
Długość statku między pionami L [m]	138,0	185,0	175,4	240,0
Szerokość statku B [m]	23,0	25,3	32,2	32,2
Zanurzenie T [m]	8,5	10,6	12,0	11,6
Współczynnik pełnotliwości podwodzia C_B [–]	0,804	0,820	0,805	0,815
Współczynnik pełnotliwości wodnicy C_{WP} [–]	0,892	0,854	0,873	0,872
Wyporność ∇ [m ³]	21441	40831	56396	73910
Prędkość statku V [m/s]	7,33	7,51	8,69	7,72
Parametr	Statek kontenerowiec			
	K1	K2	K3	
Długość statku między pionami L [m]	140,14	171,94	210,2	
Szerokość statku B [m]	22,3	25,3	32,24	
Zanurzenie T [m]	8,25	9,85	10,5	
Współczynnik pełnotliwości podwodzia C_B [–]	0,641	0,698	0,646	
Współczynnik pełnotliwości wodnicy C_{WP} [–]	0,809	0,828	0,807	
Wyporność ∇ [m ³]	17290	29900	47250	
Prędkość statku V [m/s]	8,44	9,62	11,37	

Źródło: opracowanie własne.

3.5. Określenie zakresu aproksymacji parametrów i właściwości statków transportowych

Podczas rejsu statku na danej linii żeglugowej, na której występują średnie statystyczne parametry falowania i wiatru, przedstawione np. w atlasach pogodowych (rozdz. 4), parametry eksploatacyjne statku związane z jego ruchem są zmienne, a charakter tych zmian jest losowy, tak jak losowe jest wymuszenie, czyli falowanie i wiatr. Aby więc dobrać odpowiednie funkcje aproksymacyjne, ustalić ich zakres i dokładność, zbadano zakres zmienności tych parametrów związanych z ruchem statku, a mających wpływ na prędkość eksploatacyjną.

Tymi parametrami wynikającymi z ruchu statku w rzeczywistych warunkach pogodowych są:

- chwilowa prędkość statku,
- dodatkowy opór od fali, wiatru, steru płetwowego,
- kąt dryfu statku,
- kąt wychylenia steru płetwowego,
- prędkość obrotowa i moc silnika napędowego.

Obliczenia rozkładów wymienionych parametrów wykonano dla wybranych statków z bazy B płynących na zadanej trasie żeglugi.

Algorytm obliczeniowy, przedstawiony w pracach [97–99], wykorzystuje dokładne metody obliczeniowe zawarte w rozdziałach: 5. (całkowity opór statku) i 7. (napęd statku). Wyniki obliczeń (rozkłady badanych parametrów) zamieszczono w rozdziałach: 6. (aproksymacje składników oporu całkowitego) i 8. (aproksymacje napędu statku).

Na podstawie otrzymanych rozkładów, a w szczególności średnich statystycznych wartości badanych parametrów związanych z ruchem statku na linii żeglugowej w rzeczywistych warunkach pogodowych, ustalono zakresy szukanych aproksymacji dokładnych wartości sił działających na statek podczas rejsu.

3.6. Wykaz parametrów geometrycznych kadłuba statku, znanych na etapie projektowania wstępnego

Opracowane modele parametryczne składników całkowitego oporu statku oraz naporu śruby i mocy napędu, aby były przydatne na etapie projektowania wstępnego, muszą zawierać tylko podstawowe parametry geometryczne kadłuba statku. Należą do nich:

- długość L ,
- szerokość B ,
- zanurzenie T ,
- wysokość boczna H ,
- wyporność ∇ ,
- współczynnik pełnotliwości podwodzia C_B ,
- współczynnik pełnotliwości wodnicy C_{WP} ,
- współczynnik pełnotliwości wzdłużnej, walcowej C_P ,

oraz ewentualnie stosunki wymiarów głównych, np. L/B , B/T .

3.7. Poszukiwanie postaci funkcji aproksymującej badane właściwości statku

Poszukiwanie postaci funkcji aproksymującej badane własności statku: jego całkowity opór oraz napęd, przeprowadzono według następujących kryteriów:

- wysoka dokładność,
- prostota funkcji aproksymacyjnej.

Poszukiwanie odpowiedniej funkcji aproksymacyjnej dla badanej własności rozpoczynano od najprostszej postaci – klasa funkcji liniowych. W przypadku gdy stawiana hipoteza okazywała się błędna (zbyt duże błędy aproksymacji), poszukiwano innych rozwiązań w klasie funkcji nieliniowych, takich jak: funkcje wielomianowe, funkcje potęgowe, funkcje wykładnicze, funkcje wymierne, funkcje trygonometryczne itp. lub odpowiednich ich kombinacji. Jeżeli wszystkie wymienione postacie funkcji aproksymacyjnych zawodziły, stosowano

sztuczne sieci neuronowe – ta metoda nie daje prostego wyrażenia aproksymacyjnego, ale w niektórych przypadkach była jedyną możliwą metodą dającą wystarczającą dokładność aproksymacji.

Po przeprowadzeniu wielu analiz, ostatecznie do aproksymacji badanych własności statku wykorzystano:

- regresję dla jednej zmiennej [59],
- regresję wieloraką [56],
- sztuczne sieci neuronowe [17, 76].

Oddzielnym problemem był wybór zmiennych istotnych (parametrów statku) z listy parametrów znanych na etapie projektowania wstępnego (rozdz. 3.6). Przy wyborze tych parametrów badano i oceniano potencjalne związki pomiędzy własnościami statku – w tym zakresie kierowano się: analogią, doświadczeniem, analizą merytoryczną i intuicją. Zmienne objaśniające modelu aproksymacyjnego dobierano tak, aby były spełnione wymagania:

- odpowiednio wysoka zmienność,
- silna korelacja ze zmienną objaśnianą,
- słaba korelacja między sobą,
- silna korelacja z parametrami statku, które nie weszły do zbioru zmiennych objaśniających.

Dla każdej aproksymowanej własności statku opracowano wiele różnych wersji (modeli) funkcji aproksymujących (hipotezy robocze) – przebieg doboru tych funkcji, jak i odpowiednie testy (weryfikacje) przeprowadzono według następujących algorytmów:

Dla metod regresyjnych

1. Określono zbiór parametrów projektowych, które w sposób istotny będą wpływały na opisywaną wielkość (np. składnik oporu całkowitego).
2. Opracowano zbiory wartości projektowych do obliczeń badanej własności (baza A – dane statków zbudowanych).
3. Opracowano przedziały tych parametrów – zmienne objaśniające.
4. Wyznaczono wzorcowe wartości badanej własności – zmienna objaśniana.
5. Poszukiwano modelu funkcji aproksymującej.
6. Wyznaczono funkcję aproksymującą.
7. Zweryfikowano statystycznie model na podstawie danych statków z bazy A, wykorzystując analizę statystyczną (testy istotności, analiza wariancji, analiza reszt itp.).
 - Miernikiem pozwalającym ocenić stopień dopasowania modelu do danych empirycznych jest współczynnik determinacji R^2 , czyli stosunek zmienności wyjaśnionej do zmienności całkowitej (najczęściej brany był pod uwagę skorygowany współczynnik R^2). Badany był także standardowy błąd estymacji, który informuje o przeciętnej wielkości odchylen empirycznych wartości zmiennej zależnej (objaśnianej) od wartości wyliczonych z modelu.
 - Podczas weryfikacji statystycznej otrzymanego modelu badano m.in. istotność parametrów modelu, istotność całego modelu oraz założenia metody najmniejszych kwadratów wykorzystanej do estymacji współczynników równania regresji. Wykonano testy istotności (t-Studenta) oraz testy globalne (test F–Fishera-Snedecora [63]).

– Po oszacowaniu parametrów modelu przeprowadzono również analizę wartości resztowych (sprawdzenie, czy skonstruowany model spełnia założenia metody najmniejszych kwadratów i czy reszty modelu są rozkładem normalnym).

– Podczas weryfikacji modelu regresji prowadzono również analizę wartości przewidywanych. Ułatwia to wychwycenie nietypowych wartości (odstające przypadki) czy błędnie wprowadzonych danych.

8. Weryfikacja merytoryczna modelu na podstawie porównania wyników uzyskanych z modelu z wynikami dla statków wzorcowych (baza B) i ewentualnie z badaniami modelowymi (błąd względny i bezwzględny).

9. Ostateczny wybór modelu – postaci funkcji aproksymacyjnej.

10. Ocena modelu dla wybranych parametrów statku – sprawdzenie wpływu wybranych parametrów projektowych na badaną własność statku według wyników uzyskanych z modelu.

Dla sztucznych sieci neuronowych

1. Określono zbiór parametrów projektowych, które w sposób istotny będą wpływały na opisywaną wielkość (np. składnik naporu).

2. Opracowano zbiór wartości projektowych do obliczeń badanej własności (baza A – dane statków zbudowanych) oraz opracowano przedziały zmienności tych parametrów – dane wejściowe.

3. Wyznaczono wzorcowe wartości badanej własności – dane wyjściowe.

4. Dobrano strukturę sieci neuronowej oraz funkcję aktywacji.

5. Skalowano dane wejściowe i wartości wyjściowe.

Z uwagi na występowanie dużych różnic w zakresach danych wejściowych oraz własności użytej funkcji aktywacji (dane wyjściowe ze ściśle określonego przedziału $[-1; 1]$) zarówno dane wejściowe, jak i wartości na wyjściu odpowiednio przeskalowano w następujący sposób:

$$x_{sk} = \frac{2(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} - 1, \quad (3.4)$$

$$y = \frac{(y_{sk} + 1)(y_{\max} - y_{\min})}{2} + y_{\min}, \quad (3.5)$$

gdzie:

x_{sk} – wartość wejściowa przeskalowana,

x – wartość wejściowa,

x_{\min}, x_{\max} – minimalna i maksymalna wartość wielkości wejściowej,

y_{sk} – wartość wyjściowa przeskalowana – uzyskana z sieci,

y – wartość wyjściowa,

y_{\min}, y_{\max} – minimalna i maksymalna wartość wielkości wyjściowej.

6. Uczenie sieci.

Uczenie sieci przeprowadzono dla zbioru danych wejściowych (baza A) składających się z 70% losowo wybranych danych z całego zbioru, pozostałe dane wykorzystano jako dane testujące oraz walidacyjne. Uczenie sieci neuronowej trwało do momentu, aż wartość błędu

średniokwadratowego (3.6) nie ulegała już zmianie. Błąd ten wykorzystywano do oceny jakości uzyskanej sieci i w trakcie nauki podlegał minimalizacji:

$$mse = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [w(k) - s(k)]^2, \quad (3.6)$$

gdzie:

- $w(k)$ – wartość wzorcowa (w zbiorze uczącym),
- $s(k)$ – wartość obliczona przez sieć.

W trakcie procesu uczenia wyznaczano wartości wag dla poszczególnych połączeń neuronów oraz wartości progowe dla każdej warstwy sieci neuronowej.

7. Weryfikacja statystyczna.

Podstawą weryfikacji statystycznej, jak w przypadku metod regresyjnych był:

- stopień dopasowania, uzyskanych funkcji aproksymacyjnych, w postaci współczynnika determinacji R^2 ;
- wykresy rozrzutu wartości przewidywanych względem obserwowanych (wykresy rozrzutu wartości uzyskanych z aproksymacji względem wzorcowych);
- błąd średniokwadratowy jako miara jakości nauczanej sieci.

8. Weryfikacja merytoryczna.

Ocenę jakości uzyskanych aproksymacji przeprowadzono na podstawie porównania wyników uzyskanych z sieci neuronowej z wynikami dla statków wzorcowych (baza B) i ewentualnie z badaniami modelowymi (błąd względny i bezwzględny).

4. ŚRODOWISKO MORSKIE

4.1. Elementy środowiska morskiego mające wpływ na średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną statku

Środowisko morskie charakteryzuje się wieloma elementami, ale do opracowania modelu prędkości eksploatacyjnej, przydatnego w projektowaniu wstępnym, brane będą pod uwagę tylko:

- wiatr,
- falowanie wiatrowe,
- powierzchniowe prądy morskie.

Wszystkie wymienione elementy środowiska morskiego są opisywane własnymi parametrami, które mogą się bardzo różnić między sobą. Także rejony występowania tych elementów oraz sposób oddziaływania na statek jest też bardzo różny, np. wiatr i falowanie, poza bardzo małymi okresami ciszy, występują przez cały rok na wszystkich akwenach morskich i w sposób ciągły wpływają na opór statku, a tym samym na jego prędkość. Natomiast powierzchniowe prądy morskie występują tylko w określonych regionach i przeważnie mają ustalone, zdeterminowane parametry.

Występujące na morzach i oceanach inne elementy środowiska, jak: fala martwa, cyklony, góry lodowe itp. zjawiska [77], występujące sporadycznie na niektórych akwenach morskich, nie będą brane pod uwagę przy określaniu średniej statystycznej prędkości statku transportowego.

4.2. Falowanie wiatrowe

Falowaniem morskim nazywa się odkształcanie się swobodnej, niezakłóconej powierzchni wody. Odkształcanie to może być wywołane różnymi przyczynami, które mają wpływ na charakter (zmiennosć podstawowych parametrów) powstającego falowania. W przypadku określania dodatkowego oporu statku i jego prędkości wzięto pod uwagę tylko falowanie losowe wiatrowe (wywołane oddziaływaniem wiatru).

Falowanie wiatrowe (nieregularne, losowe) jest tym rodzajem falowania, które najczęściej występuje na morzach i oceanach. Samo falowanie wiatrowe jest zjawiskiem wysoce losowym, tzn. charakteryzuje się dużą nieregularnością zarówno w czasie, jak i w przestrzeni [47]. Falowanie wiatrowe występuje bezpośrednio na akwenu, nad którym wieje wiatr. Rozchodzi się ono nieznacznie odchyłone od kierunku wiatru. Parametry powstającego falowania wiatrowego zależą od prędkości, kierunku i czasu wiania wiatru oraz od rozciągłości i ukształtowania akwenu, a także od głębokości wody. Oznacza to, że w różnych rejonach tego samego oceanu czy morza przy tej samej prędkości wiatru występuje falowanie o różnych parametrach statystycznych.

Ze względu na znaczną nieregularność, przypadkowość i złożoność falowania w czasie sztormu do jego opisu stosuje się modele probabilistyczne oparte na procesach losowych.

Ze względu na zmienność statystycznych parametrów falowania w czasie (np. wysokości H_w , długości L_w , okresu T_w) stosowane są dwa modele:

1. Falowanie krótkoterminowe – jest to model w pełni rozwiniętej fali sztormowej będącej procesem losowym, jednorodnym, stacjonarnym i ergodycznym, w którym statystyczne parametry falowania, włącznie z wariancją tego procesu $D_{\zeta\zeta}$, są stałe, niezależne od czasu.

2. Falowanie długoterminowe – statystyczne parametry falowania, włącznie z wariancją, zależą od czasu.

W budownictwie okrętowym do badania zachowania się statku na fali niezbędne są parametry fali, takie jak: wysokość H_w , długość L_w , okres T_w i kierunek geograficzny fali μ oraz prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Wszystkie te parametry można wyznaczyć z odpowiednich rozkładów w ramach modelu falowania krótkoterminowego lub długoterminowego.

4.2.1. Falowanie krótkoterminowe

W ramach prognozy krótkoterminowej statystyczne parametry fali o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia można obliczyć z odpowiednich rozkładów. Dla wysokości fali H_w stosowany jest rozkład Rayleigha [18, 80], dany wzorem:

$$f(H_w) = \frac{H_w}{4D_{\zeta\zeta}} \exp\left(-\frac{H_w^2}{8D_{\zeta\zeta}}\right), \quad (4.1)$$

gdzie $D_{\zeta\zeta}$ jest wariancją falowania. Z rozkładu tego można obliczyć średnią statystyczną wysokość fali (przy stałej wariancji) z założonym prawdopodobieństwem przekroczenia, np. znacząca wysokość fali H_S (średnia z 1/3 najwyższych fal) jest równa:

$$H_S = 4,0\sqrt{D_{\zeta\zeta}}. \quad (4.2)$$

Wysokość fali nieregularnej jest też definiowana z $p\%$ zabezpieczeniem (jest to wysokość fali, którą średnio może przekroczyć $p\%$ fal), np. wysokość fali z 3-procentowym zabezpieczeniem jest równa:

$$H_{W3\%} = 5,3\sqrt{D_{\zeta\zeta}}. \quad (4.3)$$

Stacjonarne w czasie i jednorodne w przestrzeni krótkoterminowe falowanie nieregularne jest opisywane także funkcją gęstości widmowej energii falowania $S_{\xi\xi}(\omega)$, która pokazuje w jaki sposób całkowita średnia energia fali nieregularnej, przypadająca na jednostkę sfalowanej powierzchni wody, rozłożona jest pomiędzy poszczególne składowe harmoniczne. Funkcję gęstości widmowej $S_{\xi\xi}(\omega)$ charakteryzuje się zazwyczaj jej momentami m . Moment n -tego rzędu funkcji gęstości widmowej falowania płaskiego (fala rozchodzi się w jednym kierunku) zdefiniowany jest w następujący sposób:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{\xi\xi}(\omega) d\omega, \quad (4.4)$$

gdzie:

m_n – moment n -tego rzędu funkcji gęstości widmowej $S_{\xi\xi}(\omega)$ falowania płaskiego,
 ω – częstość fali harmoniczej.

Momenty funkcji gęstości widmowej są wykorzystywane także do definiowania okresów fal nieregularnych:

$$\bar{T}_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}, \quad (4.5)$$

\bar{T}_0 – średni okres fali odniesiony do miejsc zerowych,

$$\bar{T}_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \quad (4.6)$$

\bar{T}_2 – średni okres fali odniesiony do kolejnych maksimów,

$$\bar{T}_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1}, \quad (4.7)$$

\bar{T}_1 – średni okres charakterystyczny, który jest najbliższy tzw. wizualnemu okresowi fali T_V ,

$$\bar{\lambda}_0 \approx k \frac{g \bar{T}_0^2}{2\pi}, \quad (4.8)$$

$\bar{\lambda}_0$ – średnia długość fali nieregularnej,

k – współczynnik, $0,5 < k < 1$.

Oprócz parametrów fali nieregularnej, definiowanych na podstawie rozkładu Rayleigha (dla wysokości fali) lub momentów funkcji gęstości widmowej (dla okresu, długości) są stosowane tzw. wizualne parametry określone na podstawie obserwacji, bez dokonywania dokładnego pomiaru. W literaturze znane są różne zależności, np. według pracy [61]:

$$\begin{aligned} \bar{H}_S &= 1,68 H_V^{0,75}, \\ \bar{T}_1 &= 0,87 T_V^{0,96}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

lub według pracy [54]:

$$\begin{aligned} \bar{H}_S &= H_V^{1,08}, \\ \bar{T}_1 &= 2,30 T_V^{0,73}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

gdzie H_V i T_V są odpowiednio wizualną wysokością i okresem obserwowanej fali.

W budownictwie okrętowym stosowane są różne funkcje gęstości widmowej; najczęściej stosowane są funkcje: standardowa ITTC [18] i bardziej uniwersalna dla zastosowań oceanotechnicznych JONSWAP [24, 47]:

ITTC:

$$S_{\xi\xi}(\omega) = A \omega^{-5} \exp(-B \omega^{-4}), \quad (4.11)$$

gdzie:

$S_{\xi\xi}(\omega)$ – funkcja gęstości widmowej energii falowania [$\text{m}^2 \cdot \text{s}$],
 ω – częstość składowej fali harmoniczej, którą jest liniowa fala regularna [$1/\text{s}$],
 A, B – stałe funkcji widmowej,

$$\begin{aligned} A &= 173 H_S^2 / \bar{T}_1^4 \\ B &= 691 / \bar{T}_1^4 \end{aligned} \quad (4.12)$$

H_S – znacząca wysokość fali [m],
 \bar{T}_1 – średni okres charakterystyczny fali [s].

JONSWAP:

$$\begin{aligned} S_{\xi\xi}(\omega) &= \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^a, \\ a &= \exp \left[-(\omega - \omega_m)^2 / 2(\delta \omega_m)^2 \right], \end{aligned} \quad (4.13)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,076 \bar{x}^{-0,22}, \\ \omega_m &= 2\pi f_m, \\ f_m &= 3,5 \left(\frac{g}{\bar{V}_A} \right) \bar{x}^{-0,33}, \\ L_A &= g x / \bar{V}_A^2, \\ \delta &= 0,07 \text{ dla } \omega \leq \omega_m \text{ i } 0,09 \text{ dla } \omega > \omega_m, \end{aligned} \quad (4.14)$$

L_A – rozciągłość akwenu w kierunku wiania wiatru [m],
 \bar{V}_A – średnia prędkość wiatru [m/s],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

Przedstawione przykłady funkcji gęstości widmowej energii falowania opisują tzw. płaskie falowanie nieregularne. W tym modelu zakłada się, że cała energia falowania (wszystkie składowe harmoniczne) przychodzi z jednego kierunku, którym jest kierunek główny. W rzeczywistości fale, jak i energia z nimi związana, przychodzą z różnych kierunków – jest to przestrzenne falowanie nieregularne. Do opisu takiego falowania stosowane są przestrzenne funkcje gęstości widmowej energii falowania w postaci $S_{\xi\xi}(\omega, \mu)$. Do obliczeń parametrów fali przestrzennej najczęściej wykorzystane są funkcje gęstości widmowej dla fali płaskiej [18]:

$$S_{\xi\xi}(\omega, \mu) = S_{\xi\xi}(\omega) f(\mu), \quad (4.15)$$

gdzie funkcja kąтового rozkładu gęstości energii $f(\mu)$ w przypadku widma ITTC ma postać [18]:

$$f(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \mu, \quad -\frac{\pi}{2} < \mu < \frac{\pi}{2}. \quad (4.16)$$

Przedstawiony rozkład Rayleigha oraz funkcje gęstości widmowej energii falowania w dalszej części pracy wykorzystano do obliczeń właściwości morskich statku, w tym i dodatkowego oporu, na konkretnej fali o parametrach statystycznych H_w i T_w .

4.2.2. Falowanie długoterminowe

W długich okresach falowanie morskie nie jest procesem stacjonarnym, tzn. wartość średnia i wariancja są zmienne w czasie: $\bar{\zeta}(t)$, $D_{\xi\zeta}(t)$. Do obliczeń statystycznych parametrów fali długoterminowej, np. jej wysokości (gdy brak jest pomiarów parametrów fali), stosuje się funkcje rozkładu gęstości prawdopodobieństwa Weibulla [18], której postać dla wysokości i okresów fali jest następująca:

$$f(x) = \left(\frac{\gamma}{b}\right) \left(\frac{x-a}{b}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{\gamma}\right], \quad (4.17)$$

gdzie:

x – wysokość lub okres fali długoterminowej,

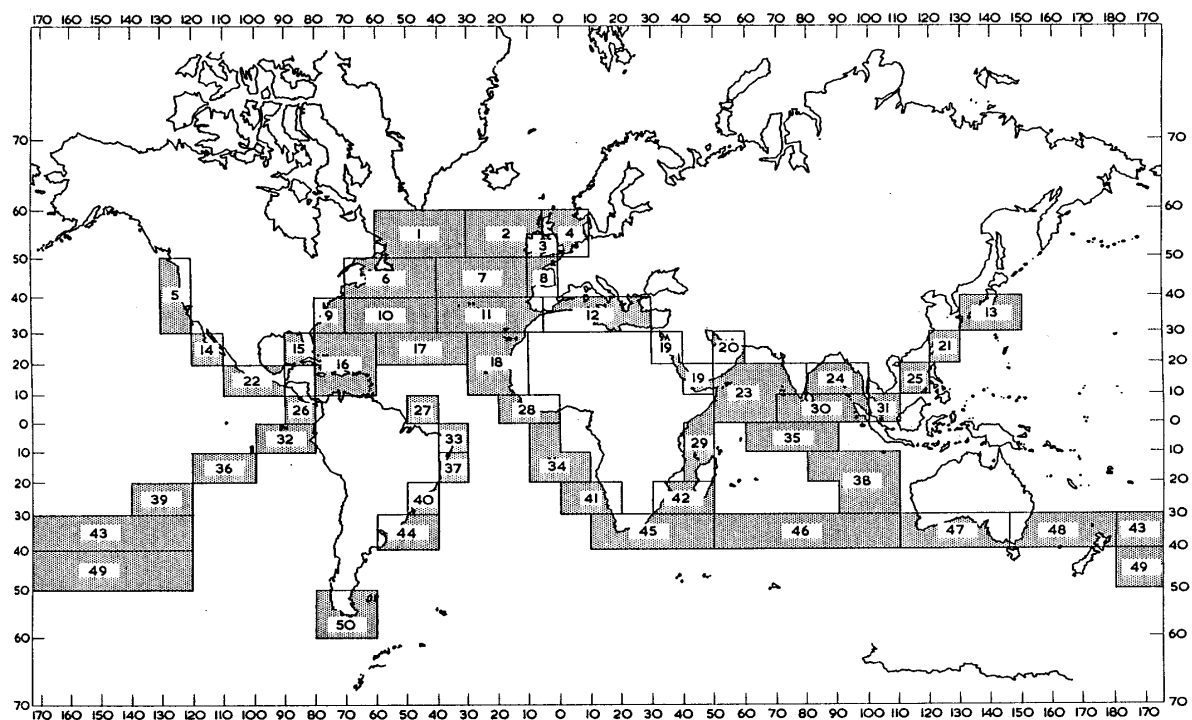
a, b, γ – parametry rozkładu Weibulla.

Oprócz funkcji rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla, statystyczne parametry falowania na morzach i oceanach otrzymane z pomiarów dla konkretnych akwenów są od wielu lat gromadzone i po odpowiednim opracowaniu wydawane w postaci książkowej (atlasy parametrów na morzach i oceanach).

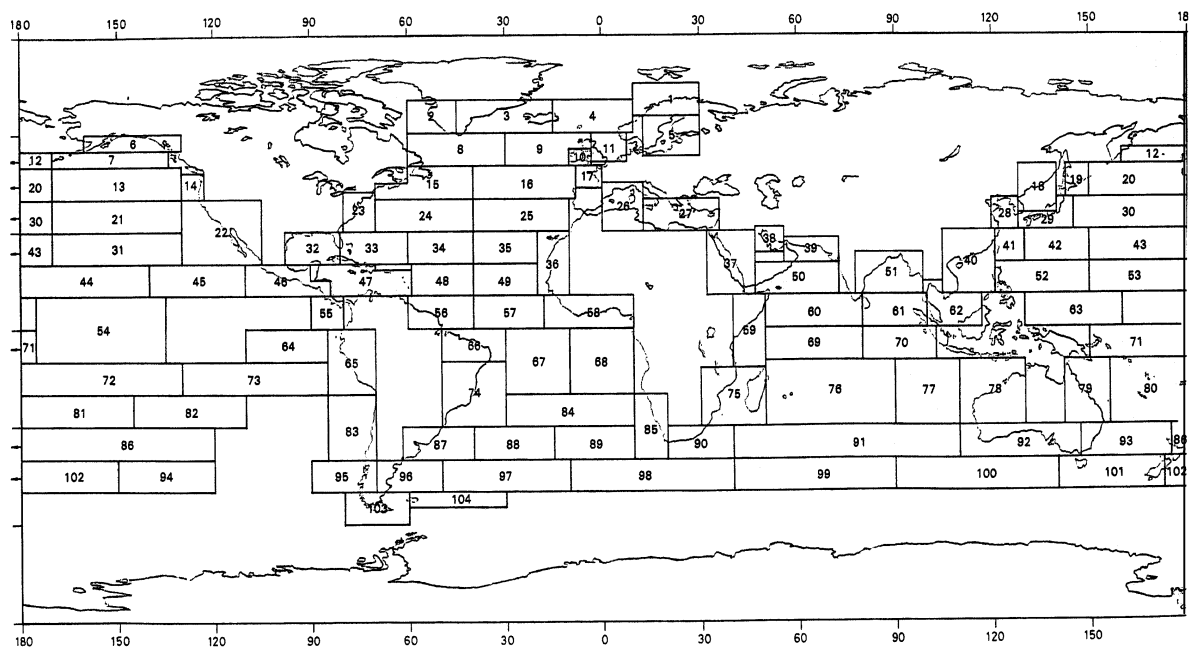
W atlasach tych zawarte są liczebności, zarejestrowanych na określonych akwenach, fal o parametrach: wysokość H_S , okres T_I i kierunek geograficzny μ lub też prawdopodobieństwa wystąpienia fal o tych parametrach. W niektórych atlasach parametry fal rejestrowane i opracowywane są z podziałem na pory roku (dane sezonowe).

Przykład podziału mórz i oceanów na akweny według atlasu [33] przedstawiono na rysunku 4.1, natomiast liczebności zarejestrowanych fal o określonych parametrach statystycznych z atlasu [33] zawarto w tabelach 4.1 oraz 4.3. Na podstawie danych statystycznych zawartych w atlasie [33] opracowano bazę zawierającą prawdopodobieństwa wystąpienia fal na danym akwenie, o określonej wysokości H_S , okresie T_I i kierunku μ – przykłady w tabelach 4.2 i 4.4.

Rozszerzeniem atlasu [33] jest atlas [32] (rys. 4.2), w którym zawarte są pomiary długoterminowych (sezonowych) statystycznych parametrów falowania na wszystkich morzach i oceanach, po których przebiegają linie żeglowne.



Rys. 4.1. Podział oceanów na akweny o zróżnicowanym falowaniu według atlasu [33]
Źródło: [33].



Rys. 4.2. Podział oceanów na akweny o zróżnicowanym falowaniu według atlasu [32]
Źródło: [32].

Tabela 4.1. Liczebności fal o wysokości H_s i okresie T_I dla kierunku $\mu = 000$ deg na akwenie 1. w zimie (grudzień–luty)

H_s [m]	T_I [s]										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
0,25		2									
0,5		1	1	1							
1,0		8	2	1	1						
1,5		2	4	5		2					
2,0			5		3						
2,5		1	5	4	3						
3,0			1	3	2	1					
3,5			1	4	5						
4,0				1	1	4	1	1			
4,5				4	2		1	1			
5,0					1						
6,0				1							
6,5				1	2						
7,5					1						

Źródło: [33].

Tabela 4.2. Prawdopodobieństwa wystąpienia fali o wysokości H_s i okresie T_I dla danego kierunku $\mu = 000$ deg na akwenie 1. w zimie (grudzień–luty)

H_s [m]	T_I [s]										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
0,25		0,023									
0,5		0,011	0,011	0,011							
1,0		0,091	0,023	0,011	0,011						
1,5		0,023	0,045	0,057		0,023					
2,0			0,057		0,034						
2,5		0,011	0,057	0,045	0,034						
3,0			0,011	0,034	0,023	0,011					
3,5			0,011	0,045	0,057						
4,0				0,011	0,011	0,045	0,011	0,011			
4,5				0,045	0,023		0,011	0,011			
5,0					0,011						
6,0				0,011							
6,5				0,011	0,023						
7,5					0,011						

Źródło: opracowanie własne na podstawie [33].

Tabela 4.3. Liczebności fal o wysokości H_s i okresie T_l dla wszystkich kierunków μ na akwenu 1. w zimie (grudzień–luty)

H_s [m]	T_l [s]										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
0,25	5	15	2								
0,5	1	32	6	3							4
1,0	10	75	37	6	6	3					1
1,5	15	42	133	48	9	6					2
2,0	20	17	105	85	45	12	4	1	1		
2,5	17	13	90	117	72	16	7	2	1		
3,0	32	2	41	88	67	28	4	1	1		
3,5	14	2	29	78	81	39	10	3			
4,0	14	4	10	58	42	27	8	2			
4,5	10	2	12	60	51	26	14	12			1
5,0	4		3	3	7	6		2			
5,5	1		5	4	10	9	5	2			
6,0	1	2	6	22	23	8	7	3			
6,5	2		8	22	19	16	9				
7,0	1			2	12	4	2		1		
7,5	4		1	4	17	15	3	1			1
8,0	3	1	2	2	13	7	1	2			
8,5			1	3	9	4	1	1			
9,0			1	3	8	1	1		1		
9,5	2			6	6	8	2	3	5		1
15,0					1						

Źródło: [33].

Tabela 4.4. Prawdopodobieństwa wystąpienia fali o wysokości H_s i okresie T_l dla wszystkich kierunków μ na akwenu 1. w zimie (grudzień–luty)

H_s [m]	T_l [s]										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
0,25	0,0021	0,0064	0,0009								
0,5	0,0004	0,0137	0,0026	0,0013							0,0017
1,0	0,0043	0,0321	0,0160	0,0026	0,0026	0,0013					0,0004
1,5	0,0064	0,0180	0,0570	0,0206	0,0038	0,0026					0,0009
2,0	0,0086	0,0073	0,0450	0,0364	0,0193	0,0051	0,0017	0,0004	0,0004		
2,5	0,0073	0,0056	0,0385	0,0501	0,0308	0,0069	0,0030	0,0009	0,0004		
3,0	0,0137	0,0009	0,0175	0,0377	0,0287	0,0112	0,0017	0,0004	0,0004		
3,5	0,0060	0,0009	0,0124	0,0334	0,0347	0,0167	0,0043	0,0013			
4,0	0,0060	0,0017	0,0043	0,0248	0,0180	0,0116	0,0034	0,0009			
4,5	0,0043	0,0009	0,0051	0,0257	0,0218	0,0111	0,0060	0,0051			0,0004
5,0	0,0017		0,0013	0,0013	0,0030	0,0026		0,0009			
5,5	0,0004		0,0021	0,0017	0,0043	0,0039	0,0021	0,0009			
6,0	0,0004	0,0009	0,0026	0,0094	0,0099	0,0034	0,0030	0,0013			
6,5	0,0009		0,0034	0,0094	0,0081	0,0069	0,0039				
7,0	0,0004			0,0009	0,0051	0,0017	0,0009		0,0004		
7,5	0,0017		0,0004	0,0017	0,0073	0,0064	0,0013	0,0004			0,0004
8,0	0,0013	0,0004	0,0009	0,0009	0,0056	0,0030	0,0004	0,0009			
8,5			0,0004	0,0013	0,0038	0,0017	0,0004	0,0004			
9,0			0,0004	0,0013	0,0034	0,0004	0,0004		0,0004		
9,5	0,0009			0,0026	0,0026	0,0034	0,0009	0,0013	0,0021		0,0004
15,0					0,0004						

Źródło: opracowanie własne na podstawie [33].

Prawdopodobieństwa wystąpienia średnich statystycznych parametrów fal – wysokości H_5 i okresu T_I na poszczególnych akwenach i w poszczególnych porach roku, zawarte w atlasach [32] i [33], są dostępne także w postaci komputerowej bazy [122, 124], którą można wykorzystać do obliczania oporu statku pływającego po sfalowanej wodzie.

4.3. Wiatr

Wiatrem nazywa się poziomą składową ruchu mas powietrza o charakterze turbulentnym, wywołanego przepływem z obszaru o wyższym ciśnieniu do obszaru o niższym ciśnieniu. Z tego też względu wiatr jest złożonym przestrzenno-czasowym procesem losowym.

Dla przepływu powietrza nad akwenem morskim, którego rozciągłość i głębokość jest bardzo duża w stosunku do wymiarów statku, liczba Reynoldsa, zdefiniowana wzorem:

$$Re = \frac{\bar{V}_A \cdot L_A}{\nu_A}, \quad (4.18)$$

gdzie:

\bar{V}_A – średnia prędkość wiatru,

L_A – rozciągłość akwenu,

ν_A – współczynnik lepkości kinematycznej powietrza,

osiąga duże wartości nawet przy bardzo małej prędkości średniej \bar{V}_A wiatru. Liczba Re jest wtedy większa od krytycznej i przepływ mas powietrza nad swobodną powierzchnią morza lub wokół jednostki pływającej jest turbulentny.

Wiatr charakteryzuje się trzema podstawowymi parametrami: prędkością, kierunkiem i współczynnikiem porywistości.

Pozioma prędkość powietrza ma dwa składniki: średnią prędkość o stałym kierunku i wartości oraz pulsacje prędkości o zmieniającym się kierunku i wartości. Chwilowa prędkość wiatru jest więc równa:

$$V_A(t) = \bar{V}_A + u_A(t), \quad (4.19)$$

gdzie:

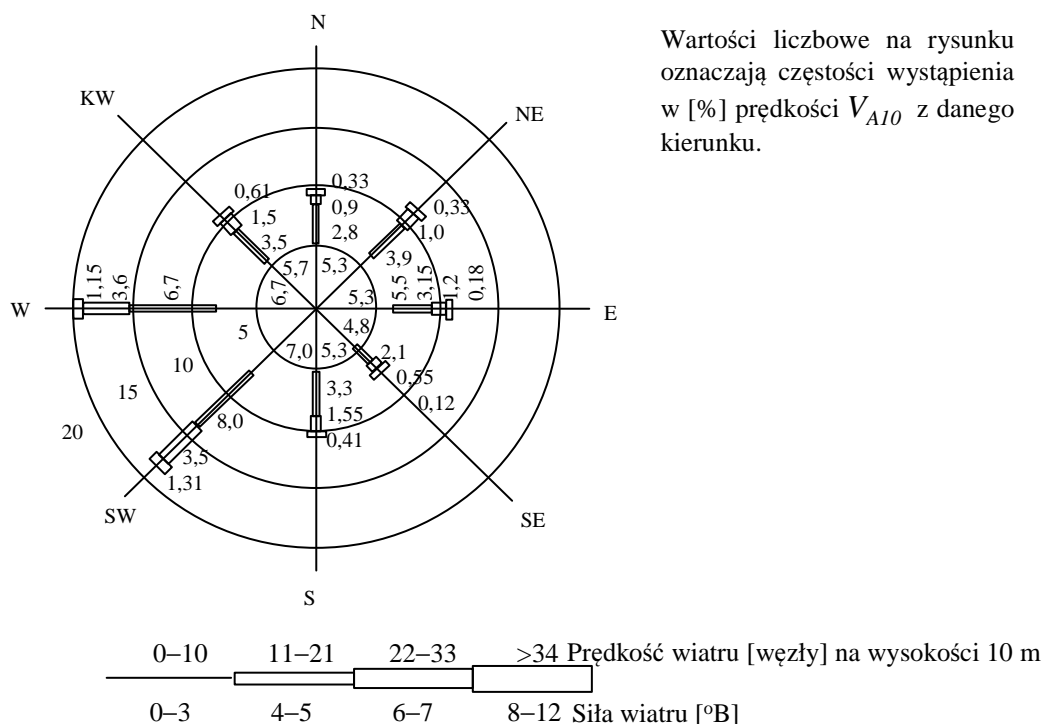
\bar{V}_A – średnia prędkość wiatru, której wartość zależy od czasu uśrednienia i wysokości nad poziomem morza (wpływ wysokości i czasu uśrednienia jest przedstawiony m.in. w opracowaniu [23]),

$u_A(t)$ – składowa pulsacji prędkości wiatru wokół wartości średniej, zgodna z kierunkiem wiatru (pozostałe dwie składowe pulsacje prędkości wiatru w badaniu oddziaływania na jednostkę pływającą są nieistotne).

Maksymalna prędkość wiatru, przekraczająca wartość średnią, jest prędkością wiatru w porywach.

Kierunkiem działania wiatru nazywa się kierunek, z którego wieje wiatr. Wartościowo kierunek określany jest bądź w układzie kątowym (w stopniach), bądź też w układzie szesnastokierunkowym, nazywanym różą wiatrów. Często na róży wiatrów zawarte są informacje

o prawdopodobieństwie wystąpienia wiatrów z danego kierunku (w niektórych przypadkach całkowite prawdopodobieństwo z danego kierunku podzielone jest na prawdopodobieństwa dla przedziałów średniej prędkości wiatru z tego kierunku – rys. 4.3).



Rys. 4.3. Przykładowa postać róży wiatrów z prawdopodobieństwami wystąpienia prędkości V_{A10} i kierunku

Źródło: opracowanie własne.

Porywistość wiatru charakteryzowana jest średnim współczynnikiem porywistości k . Chwilowy współczynnik porywistości jest równy:

$$k = \frac{V_{Amax}}{V_A}, \quad (4.20)$$

gdzie V_{Amax} jest maksymalną uśrednioną prędkością wiatru w krótkim przedziale czasu, np. 0,5 s. Średni współczynnik porywistości jest wielkością losową i maleje wraz z wysokością nad powierzchnią morza.

Wartość średniej prędkości wiatru zmienia się wraz z wysokością pomiaru tej prędkości nad powierzchnią morza, tworząc tzw. profil wiatru (rys. 4.4 – pełną prędkość wiatr osiąga dopiero na wysokości powyżej 22 m). Zależność średniej prędkości wiatru od wysokości można aproksymować następującymi wyrażeniami:

$$\frac{\bar{V}_{AZ}}{\bar{V}_{A10}} = \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{10}{z_0}}, \quad (4.21)$$

$$\frac{\bar{V}_{AZ}}{\bar{V}_{A10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha, \quad (4.22)$$

gdzie:

\bar{V}_{A10} – średnia prędkość wiatru na wysokości 10 m nad poziomem morza,

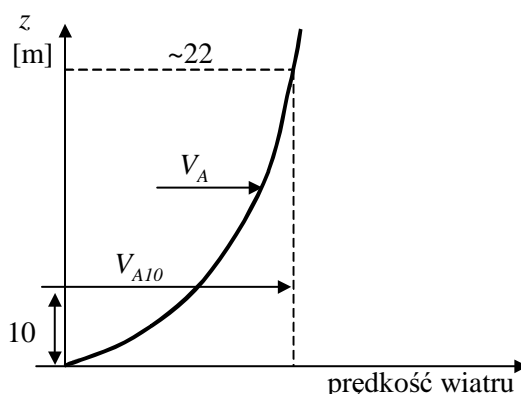
\bar{V}_{AZ} – średnia prędkość wiatru dla wysokości z ,

z_0 – poziom „szorstkości” morza (prędkość wiatru na tym poziomie jest zerowa);

$z_0 \cong (0,2-0,5) \text{ cm}$,

z – wysokość nad poziomem morza, dla której obliczona jest prędkość V_A ,

α – współczynnik linii profilu wiatru, zwykle $\alpha = 0,1-0,15$.



Rys. 4.4. Profil prędkości wiatru

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak w przypadku falowania, publikowane są statystyczne parametry wiatru (prędkość, kierunek) na różnych akwenach morskich i dla różnych pór roku [122, 124].

4.4. Prądy morskie

Prąd morski to turbulentny przepływ mas wodnych na morzach i oceanach, charakteryzujący się określoną prędkością i kierunkiem. Ze względu na bardzo powolne zmiany w czasie prędkości i kierunku, prąd morski traktuje się jako zjawisko zdeterminowane o quasi-statycznej wartości średniej prędkości V_C i kierunku γ_C .

Prądy morskie można podzielić na:

- ze względu na przyczynę powstawania – pływowe, wiatrowe, dryfowe, gradientowe;
- ze względu na głębokość występowania – powierzchniowe, podpowierzchniowe, głębinowe i przydenne;
- według kierunków – poziome i pionowe;
- w zależności od czasu trwania – stałe i okresowe;
- według cech termicznych, w stosunku do wód otaczających – ciepłe i chłodne.

Ze względu na postawiony w pracy cel, pod uwagę będą brane tylko prądy powierzchniowe występujące na wybranych liniach żeglugowych, niezależnie od przyczyny ich powstawania.

Prądy pływowe to poziome przemieszczanie się wód spowodowane pływami (pływy są wywołane wzajemnym oddziaływaniem Ziemi, Księżyca i Słońca). Na otwartych oceanach są one nieodczuwalne (średnie prędkości są pomijalnie małe).

Prądy wiatrowe są wywołane tarciem powietrza o powierzchnię wody podczas krótkotrwałego działania wiatru. W krótkim czasie po ustaniu wiania wiatru prądy te zanikają. Prądy wiatrowe obejmują powierzchniowe warstwy wody, a ich kierunek jest zgodny z przeważającym kierunkiem wiatru. Średnie prędkości prądów wiatrowych wywołanych krótkotrwałym działaniem wiatru są bardzo małe i z tego też powodu nie będą brane pod uwagę.

Prądy dryfowe powstają w wyniku długotrwałego i stałego, pod względem kierunku, oddziaływania wiatru na powierzchnię wody. W porównaniu z prądami wiatrowymi obejmują one większe masy wody i sięgają znacznych głębokości. Siła Coriolisa oraz bezwładność mas wody i tarcie powodują, że wraz z głębokością zmieniają się dwa główne parametry prądów dryfowych: kierunek i prędkość.

Na półkuli północnej prąd dryfowy odchyła się od kierunku wiatru w prawo, a na południowej w lewo. W warstwie powierzchniowej odchylenie ustaje przy zrównoważeniu się siły Coriolisa przez prostopadłą do wektora prędkości wiatru składową siłę tarcia, tzn. przy odchyleniu około 45° .

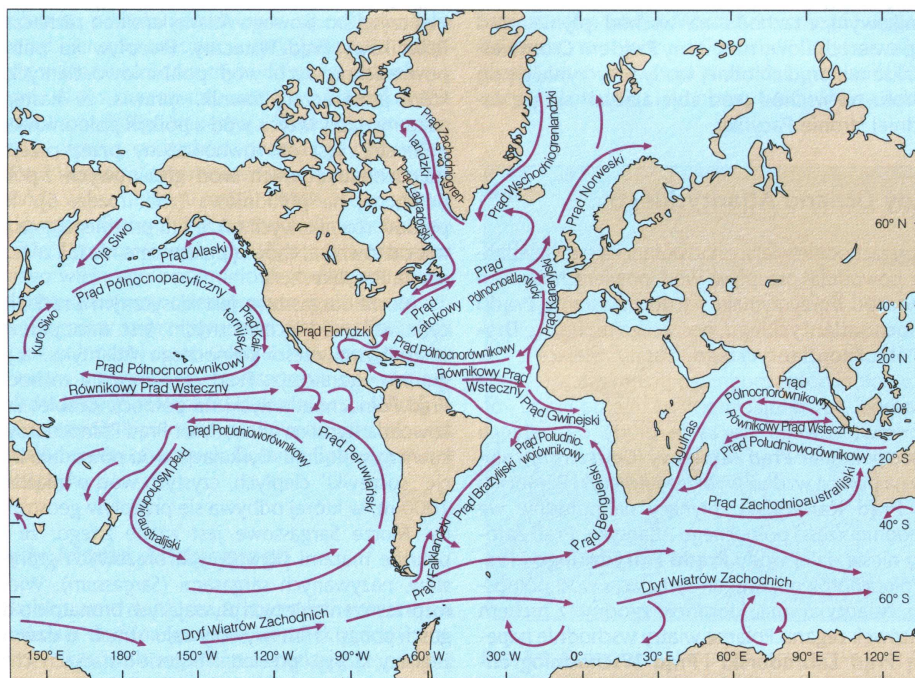
Prędkość prądu powierzchniowego, wywołanego długotrwałym działaniem wiatru, na otwartym oceanie wynosi około 0,01–0,02 prędkości wiatru, mierzonej na wysokości 10 m nad poziomem morza. Prądy dryfowe na otwartym oceanie mogą osiągnąć prędkość około 0,5 m/s.

Prądy gradientowe (gęstościowe) powstają na skutek różnej gęstości wód na powierzchni mórz i oceanów: cięższe wody opadają, a lżejsze – wypływają, powstają wtedy prądy o kierunku pionowym. Zmiany gęstości są głównie spowodowane zmianami temperatury i, rzadziej, zasolenia.

Prądy mają określone miejsce występowania i czas trwania uzależniony od czynnika wywołującego ich powstawanie. Najistotniejsze są wielkoskalowe prądy powierzchniowe, które przemieszczają się w określonych kierunkach z określonymi prędkościami w sposób ciągły. Ruch wód oceanicznych w tych prądach ma charakter zamkniętych cyrkulacji.

W obliczaniu dodatkowego oporu statku właśnie wielkoskalowe prądy powierzchniowe, przebiegające przez linie żeglugowe, mogą mieć pewien udział w zmienności oporu statku.

Trasy wielkoskalowych prądów powierzchniowych przedstawiono na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Wieloskalowe prądy powierzchniowe oceanów
Źródło: [21].

4.5. Wykorzystanie parametrów pogodowych do prognozowania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego

Podczas projektowania bardzo ważna jest znajomość prędkości eksploatacyjnej statku, jaką może on uzyskać w rzeczywistych warunkach pogodowych na zadanej linii żeglujowej. Ponieważ znajomość tej prędkości jest niezbędna już na etapie projektowania wstępnego, musi być ona uzależniona od:

- średnich statystycznych parametrów pogodowych podczas eksploatacji statku w długich okresach,
- parametrów projektowych statku (głównie geometrycznych) w taki sposób, aby można było budować model optymalizacyjny.

Do badania wpływu parametrów pogodowych na średnią prędkość statku wykorzystano średnie statystyczne długoterminowe (sezonowe) parametry wiatru i falowania, obliczane z obserwacji wieloletnich, oraz parametry wieloskalowych prądów powierzchniowych. Parametry wieloskalowych prądów powierzchniowych nie są zależne od wiatru i falowania. Natomiast parametry wiatru powinny być skorelowane z falowaniem, które jest wywołane działaniem wiatru. Statystyczne, sezonowe parametry falowania zawarte są m.in. w atlasach [32, 33].

Do obliczeń, w ramach prognozy długoterminowej, oddziaływania wiatru na pływający statek niezbędne są statystyczne długoterminowe parametry wiatru w postaci podobnej do parametrów falowania zamieszczonych w atlasach [32] lub [33]. Brak jest jednak takich danych dotyczących wiatru jak w przypadku falowania. Ponadto, aby obliczyć dodatkowy opór statku

w danej sytuacji pogodowej, parametry wiatru (V_A , γ_A) powinny być skorelowane z parametrami fali (H_S , T_I , μ), tzn. parametry fali powinny odpowiadać danej prędkości wiatru.

Do obliczeń dodatkowego oporu statku podczas pływania po sfalowanej wodzie niezbędne więc są parametry fal i parametry wiatru, który te fale wywołały, oraz odpowiednie prawdopodobieństwa ich wystąpienia.

Jeśli brakowało odpowiednich parametrów wiatru do obliczeń dodatkowego oporu, parametry wiatru określono, biorąc pod uwagę następujące założenia:

- kierunek wiania wiatru γ_A będzie taki sam jak kierunek fali μ :

$$\gamma_A = \mu, \quad (4.23)$$

- prawdopodobieństwo wystąpienia kierunku wiatru f_γ będzie takie samo jak prawdopodobieństwo wystąpienia kierunku fali f_μ :

$$f_\gamma = f_\mu, \quad (4.24)$$

- średnią prędkość wiatru obliczono ze średniego statystycznego związku pomiędzy wysokością i okresem fali a prędkością wiatru, np. ze wzoru zamieszczonego w pracy [80]:

$$\bar{H} = 0,029(\bar{V}_{A10})^{0,5} \cdot (\bar{T})^{1,5}, \quad (4.25)$$

gdzie:

\bar{V}_{A10} – średnia prędkość wiatru na wysokości 10 m nad poziomem morza [m/s],

\bar{H} – średnia wysokość fali [m],

$$\bar{H} = 0,625 H_S, \quad (4.26)$$

H_S – znacząca wysokość fali [m],

\bar{T} – średni okres fali [s],

$$\bar{T} \cong 0,9 T_I, \quad (4.27)$$

T_I – średni okres charakterystyczny fali [s],

- prawdopodobieństwo wystąpienia średniej prędkości wiatru f_{VA} będzie takie samo jak prawdopodobieństwo wystąpienia fali f_{HT} o parametrach H_S , T_I , dla której obliczono ze wzoru (4.25) średnią prędkość wiatru:

$$f_{VA} = f_{HT}. \quad (4.28)$$

W trakcie określania średniej prędkości wiatru odpowiadającej parametrom fali \bar{H} i \bar{T} okazało się, że wzór (4.25) nie daje poprawnych wyników w całym zakresie wysokości fali i jej okresu jakie są w atlasach [32] lub [33]. Wykorzystano więc tabelę 4.5 z publikacji [7] zawierającą parametry dla wiatru (siła wiatru w skali Beauforta, rozciągłość akwenu i czas wiania wiatru) i dla fali (wysokość znacząca fali i okres). Na podstawie danych z tabeli 4.5 [7] wykonano nomogram przedstawiony na rysunku 4.6 (siła wiatru została zastąpiona średnią prędkością wiatru według zależności z publikacji [51]). Posługując się nomogramem z rysunku 4.6 przygotowano tabelę 4.6 zawierającą wysokość znaczącą fali i jej okres oraz odpowiadającą jej średnią prędkość wiatru dla otwartego oceanu. Otrzymane wyniki jeszcze sprawdzono na podstawie tabeli i nomogramów z publikacji [34].

Tabela 4.5. Prędkość wiatru V_{A10} (na wysokości 10 m)

R	Stopień skali Beauforta																										
	3			4			5			6			7			8			9			10			11		
	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>H</i>	<i>P</i>
10	4,4	1,8	2,1	3,7	2,6	2,4	3,2	3,5	2,8	2,7	5,0	3,1	2,5	6,0	3,4	2,3	7,3	3,9	2,0	8,0	4,1	1,9	10,0	4,2	1,8	10,0	5,0
20	7,1	2,0	2,5	6,2	3,2	2,9	5,4	4,9	3,3	4,7	7,0	3,8	4,2	8,6	4,3	3,9	10,0	4,4	3,5	12,0	5,0	3,2	14,0	5,2	3,0	16,0	5,9
30	9,8	2,0	2,8	8,3	3,8	3,3	7,2	5,8	3,7	6,2	8,0	4,2	5,8	10,0	4,6	5,2	12,1	5,0	4,7	15,8	5,5	4,4	18,0	6,0	4,1	19,8	6,3
40	12,0	2,0	3,0	10,3	3,9	3,6	8,9	6,2	4,1	7,8	9,0	4,6	7,1	11,2	4,9	6,5	14,0	5,4	5,8	17,7	5,9	5,4	21,0	6,3	5,1	22,5	6,7
50	14,0	2,0	3,2	12,4	4,0	3,8	11,0	6,5	4,4	9,1	9,8	4,8	8,4	12,2	5,2	7,7	15,7	5,6	6,9	19,8	6,3	6,4	23,0	6,7	6,1	25,0	7,1
60	16,0	2,0	3,5	14,0	4,0	4,0	12,0	6,8	4,6	10,2	10,3	5,1	9,6	13,2	5,5	8,7	17,0	6,0	8,0	21,0	6,5	7,4	25,0	7,0	7,0	27,5	7,5
70	18,0	2,0	3,7	15,8	4,0	4,1	13,5	7,0	4,8	11,9	10,8	5,4	10,5	13,9	5,7	9,9	18,0	6,4	9,0	22,5	6,8	8,3	26,5	7,3	7,8	29,5	7,7
80	20,0	2,0	3,8	17,0	4,0	4,2	15,0	7,2	4,9	13,0	11,0	5,6	12,0	14,5	6,0	11,0	18,9	6,6	10,0	24,0	7,1	9,3	28,0	7,7	8,6	31,5	7,9
90	23,6	2,0	3,9	18,8	4,0	4,3	16,5	7,3	5,1	14,1	11,2	5,8	13,0	15,0	6,3	12,0	20,0	6,7	11,0	25,0	7,2	10,2	30,0	7,9	9,5	34,0	8,2
100	27,1	2,0	4,0	20,0	4,0	4,4	17,5	7,3	5,3	15,1	11,4	6,0	14,0	15,5	6,5	12,8	20,5	6,9	11,9	26,5	7,6	11,0	32,0	8,1	10,3	35,0	8,5
120	31,1	2,0	4,2	22,4	4,1	4,7	20,0	7,8	5,4	17,0	11,7	6,2	15,9	16,0	6,7	14,5	21,5	7,3	13,1	27,5	7,9	12,3	33,5	8,4	11,5	37,5	8,8
140	36,6	2,0	4,5	25,8	4,2	4,9	22,5	7,9	5,8	19,1	11,9	6,4	17,6	16,2	7,0	16,0	22,0	7,6	14,8	29,0	8,3	13,9	35,5	8,8	13,0	40,0	9,2
160	43,2	2,0	4,9	28,4	4,2	5,2	24,3	7,9	6,0	21,1	12,0	6,6	19,5	16,5	7,3	18,0	23,0	8,0	16,4	30,5	8,7	15,1	37,0	9,1	14,5	42,5	9,6
180	50,0	2,0	4,9	30,9	4,3	5,4	27,0	8,0	6,2	23,1	12,1	6,8	21,3	17,0	7,5	19,9	23,5	8,3	18,0	31,5	9,0	16,5	38,5	9,5	16,0	44,5	10,0
200				33,5	4,3	5,6	29,0	8,0	6,4	25,4	12,2	7,1	23,1	17,5	7,7	21,5	23,5	8,5	19,3	32,5	9,2	18,1	40,0	9,8	17,1	46,0	10,3
220				36,5	4,4	5,8	31,1	8,0	6,6	27,2	12,3	7,2	25,0	17,9	8,0	22,9	24,0	8,8	20,9	34,0	9,6	19,1	41,5	10,1	18,2	47,5	10,6
240				39,2	4,4	5,9	33,1	8,0	6,8	29,0	12,4	7,3	26,8	17,9	8,2	24,4	24,5	9,0	22,0	34,5	9,8	20,5	43,0	10,3	19,5	49,0	10,8
260				41,9	4,4	6,0	34,9	8,0	6,9	30,5	12,6	7,5	28,0	18,0	8,4	26,0	25,0	9,2	23,5	34,5	10,0	21,8	44,0	10,6	20,9	50,5	11,1
280				44,5	4,4	6,2	36,8	8,0	7,0	32,4	12,9	7,8	29,5	18,0	8,5	27,7	25,0	9,4	25,0	35,0	10,2	23,0	45,0	10,9	22,0	51,5	11,3
300				47,0	4,4	6,3	38,5	8,0	7,1	34,1	13,1	8,0	31,5	18,0	8,7	29,0	25,0	9,5	26,3	35,0	10,4	24,3	45,0	11,1	23,2	53,0	11,6
320							40,5	8,0	7,2	36,0	13,3	8,2	33,0	18,0	8,9	30,2	25,0	9,6	27,6	35,5	10,6	25,5	45,5	11,2	24,5	54,0	11,8
340							42,4	8,0	7,3	37,6	13,4	8,3	34,2	18,0	9,0	31,6	25,0	9,8	29,0	36,0	10,8	26,7	46,0	11,4	25,5	55,0	12,0
360							44,2	8,0	7,4	38,8	13,4	8,4	35,7	18,1	9,1	33,0	25,0	9,9	30,0	36,5	10,9	27,7	46,5	11,6	26,6	55,0	12,2
380							46,1	8,0	7,5	40,2	13,5	8,5	37,1	18,2	9,3	34,2	25,5	10,0	31,3	37,0	11,1	29,1	47,0	11,8	27,7	55,5	12,4
400							48,0	8,0	7,7	42,2	13,5	8,6	38,8	18,4	9,5	35,6	26,0	10,2	32,5	37,0	11,2	30,2	47,5	12,0	28,9	56,0	12,6
420							50,0	8,0	7,8	43,5	13,6	8,7	40,0	18,7	9,6	36,9	26,5	10,3	33,7	37,5	11,4	31,5	47,5	12,2	29,6	56,5	12,7

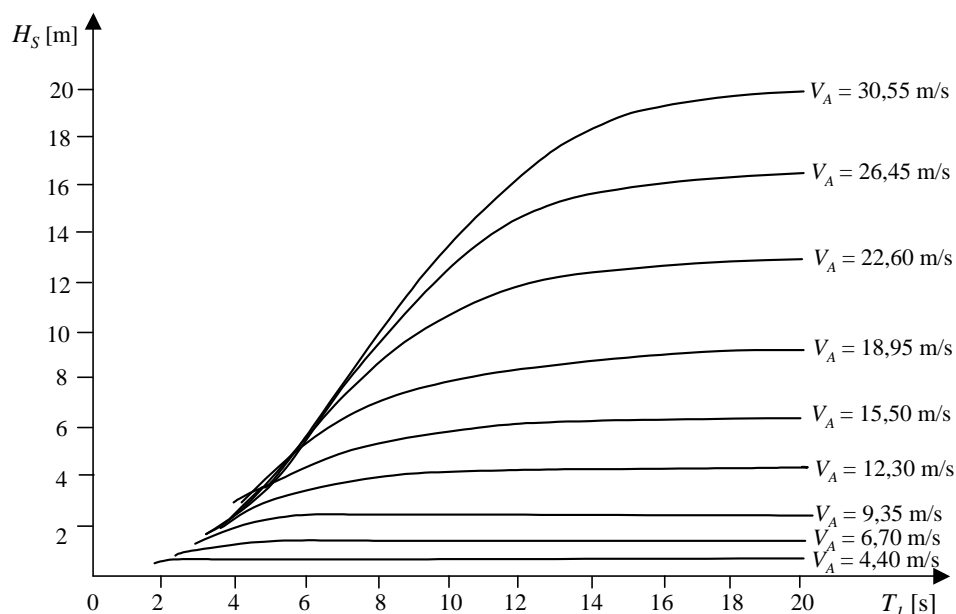
Objaśnienie: Minimalny czas T w godzinach przez jaki musi wiać wiatr aby wywołać falę o znacznej wysokości H [stopa] i okresie charakterystycznym p [s]. Rozciągłość akwenu R w milach morskich.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z publikacji [7].

Tabela 4.5. Prędkość wiatru V_{A10} (na wysokości 10 m) – cd.

440							52,0	8,0	7,9	44,7	13,7	8,8	41,3	18,8	9,7	38,1	27,0	10,4	34,8	37,5	11,5	32,5	48,0	12,3	30,9	57,0	12,9
460							54,0	8,0	8,0	46,2	13,7	8,9	42,8	19,8	9,8	39,5	27,5	10,6	36,0	37,5	11,7	33,5	48,5	12,5	31,8	57,5	13,1
480							56,0	8,0	8,1	47,8	13,7	9,0	44,0	19,0	9,9	41,0	27,5	10,8	37,0	37,5	11,8	34,5	49,0	12,6	32,7	57,5	13,2
500							58,0	8,0	8,2	49,2	13,8	9,1	45,5	19,1	10,1	42,1	27,5	10,9	38,3	38,0	11,9	35,5	49,0	12,7	33,9	58,0	13,4
550										53,0	13,8	9,3	48,5	19,5	10,3	44,9	27,5	11,1	41,0	38,5	12,2	38,2	50,0	13,0	36,5	59,0	13,7
600										56,3	13,8	9,5	51,8	19,7	10,5	47,7	27,5	11,3	43,6	39,0	12,5	40,3	50,0	13,3	38,7	60,0	14,0
650													55,0	19,8	10,7	50,3	27,5	11,6	46,4	39,5	12,8	43,0	50,0	13,7	41,0	60,0	14,2
700													58,5	19,8	11,0	53,2	27,5	11,8	49,0	40,0	13,1	45,4	50,5	14,0	43,5	60,5	14,5
750																56,2	27,5	12,1	51,0	40,0	13,3	48,0	51,0	14,2	45,8	61,0	14,8
800																59,2	27,5	12,3	53,8	40,0	13,5	50,6	51,5	14,5	47,8	61,5	15,0
850																			56,2	40,0	13,8	52,5	52,0	14,6	50,5	62,0	15,2
900																			58,2	40,0	14,0	54,6	52,0	14,9	52,0	62,5	15,5
950																						57,2	52,0	15,1	54,0	63,0	15,7
1000																						59,3	52,0	15,3	56,3	63,0	16,0

Na podstawie atlasów [32] i [33] przygotowano komputerową bazę danych o falowaniu dla wszystkich akwenów oraz bazę parametrów wiatru odpowiadających każdej fali. Dla każdego akwenu jest przypisany zbiór parametrów falowania i wiatrów w postaci umożliwiającej wykonywanie obliczeń dodatkowego oporu od falowania i wiatru.



Rys. 4.6. Nomogram do określania zależności pomiędzy średnią prędkością wiatru a wysokością znaczącą fali i jej okresem na otwartym oceanie

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z publikacji [7] oraz zależności z publikacji [51].

Tabela 4.6. Prędkość wiatru V_{A10} (na wysokości 10 m)

H_s [m]	T_l [s]										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
0,25		1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
0,5		3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
1,0		5,90	5,80	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
1,5		7,80	7,60	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30
2,0		8,60	8,35	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30	8,30
2,5		10,00	9,60	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,35	9,35	9,30
3,0		12,00	10,80	10,45	10,30	10,10	10,00	9,90	9,85	9,85	9,80
3,5		14,00	12,50	11,35	11,10	10,95	10,90	10,80	10,75	10,75	10,70
4,0		15,50	13,50	12,25	12,00	11,70	11,65	11,55	11,50	11,45	11,40
4,5		17,50	14,80	13,00	12,70	12,55	12,50	12,45	12,40	12,35	12,30
5,0		19,00	16,00	14,05	13,55	13,35	13,20	13,10	13,05	13,00	12,95
5,5		20,50	17,40	15,45	14,50	14,30	14,20	14,10	14,05	14,00	13,95
6,0		22,00	18,80	16,50	15,50	15,10	15,00	14,95	14,90	14,85	14,80
6,5		24,00	20,10	17,40	16,30	15,90	15,75	15,70	15,65	15,60	15,55
7,0		26,00	21,30	18,40	17,20	16,65	16,55	16,50	16,45	16,40	16,35
7,5		28,00	22,70	19,60	18,05	17,45	17,25	17,15	17,05	16,95	16,85
8,0		29,00	24,10	20,60	18,90	18,20	18,00	17,70	17,50	17,35	17,20
8,5		31,00	25,30	21,45	19,50	18,95	18,70	18,40	18,15	17,95	17,75
9,0		33,00	26,70	22,40	20,15	19,55	19,20	18,90	18,70	18,50	18,30
9,5		35,00	28,00	23,35	20,80	20,05	19,65	19,40	19,20	19,05	18,90
10,0		37,00	29,60	24,30	21,50	20,50	20,30	20,10	19,80	19,55	19,30

Tabela 4.6. Prędkość wiatru V_{A10} (na wysokości 10 m) – cd.

$H_s[m]$	$T_I[s]$										
	cisza	<5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–19	20–21	>21
11,0		40,00	32,20	26,30	23,00	21,50	21,10	20,80	20,55	20,45	20,35
12,0		44,00	35,00	28,30	24,70	22,50	22,60	21,70	21,50	21,30	21,15
13,0		48,00	37,50	30,30	26,40	23,80	23,90	23,50	23,20	22,45	22,55
14,0		51,00	40,50	32,30	28,00	25,15	25,00	24,70	24,30	23,80	23,50
15,0		54,50	43,00	35,00	29,50	26,50	26,20	25,90	25,40	25,00	24,70
16,0		58,00	45,50	37,00	31,00	28,00	27,40	27,00	26,60	26,20	25,70
17,0		61,50	48,50	39,50	33,00	29,50	28,60	28,20	27,70	27,30	26,90
18,0		65,00	50,50	41,50	34,50	30,50	29,80	29,30	28,90	28,40	27,90
19,0		68,00	54,00	44,50	36,00	32,00	31,0	30,50	30,00	29,50	29,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z publikacji [7].

5. WYZNACZANIE OPORU STATKU W RZECZYWISTYCH WARUNKACH POGODOWYCH

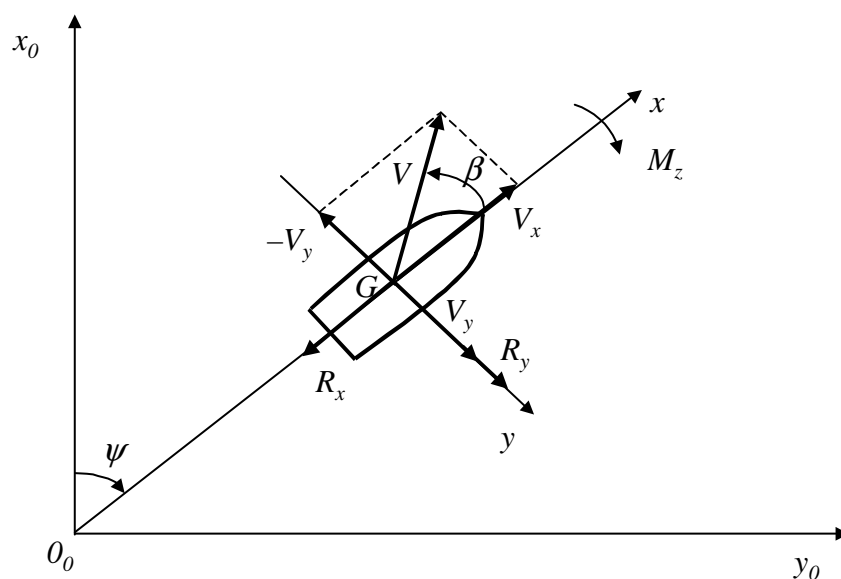
5.1. Wstęp

Jak przedstawiono w rozdziale 3.2 – wzory (3.2) i (3.3) – na całkowity opór statku składa się opór na wodzie spokojnej oraz dodatkowe składniki oporu od wiatru, prądu morskiego, falowania oraz od wychylonego steru płetwowego. W trakcie rejsu statku, gdy kierunki działania wiatru, falowania czy ewentualnie morskiego prądu powierzchniowego będą skośne w stosunku do kierunku ruchu statku, to aby utrzymać zadany kurs musi być wychylony ster płetwowy. W celu wyznaczenia, w takich warunkach, wynikowej prędkości eksploatacyjnej, oprócz całkowitego oporu, w równaniu (3.2) niezbędna jest też znajomość siły bocznej i momentu obracającego statek względem osi pionowej. Stąd przedstawione modele składników oporu statku zawierają wszystkie trzy składowe (opór wzdłużny, boczny i moment).

Przy określaniu całkowitego oporu przyjęto średni stan kadłuba statku wynikający z jego eksploatacji.

5.2. Opór statku na wodzie spokojnej

Podczas rejsu, na określonej linii żeglugowej, pod wpływem skośnego oddziaływania wiatru i fali statek może się poruszać z pewnym kątem dryfu (wtedy wektor prędkości nie leży w płaszczyźnie symetrii statku – rys. 5.1).



Rys. 5.1. Kąt dryfu statku (β)

Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli statek będzie płynął z kątem dryfu β , to w zakresie małych wartości kąta dryfu $\beta = 0^\circ - \pm 25^\circ$ opór statku jest większy niż podczas ruchu prostoliniowego (gdy wektor prędkości statku leży w płaszczyźnie symetrii statku). Podczas ruchu statku z kątem dryfu powstaje także opór boczny oraz moment wokół osi pionowej Gz (rys. 5.1), który, aby statek płynął zadany kurs, musi być równoważony momentem od siły sterującej R_{yR} na sterze płetwowym (od wychylonego steru płetwowego powstaje wtedy dodatkowy opór R_{xR}).

Siły i moment oporu statku poruszającego się na wodzie głębokiej ze stałą prędkością V i kątem dryfu β (rys. 5.1) można obliczyć z równań zawartych w publikacji [67]:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \rho_w S V^2 C_x(\beta), \\ R_y &= \frac{1}{2} \rho_w S V^2 C_y(\beta), \\ M_z &= \frac{1}{2} \rho_w S L V^2 C_m(\beta), \end{aligned} \quad (5.1)$$

gdzie:

R_x, R_y, M_z – składowe siły i moment oporu statku na wodzie spokojnej podczas pływania z kątem dryfu β ,

ρ_w – gęstość wody,

S – rzut bocznej powierzchni podwodnej kadłuba na PS,

V – prędkość statku,

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \quad (5.2)$$

β – kąt dryfu,

L – długość statku,

C_x, C_y, C_m – współczynniki sił oporu i momentu obracającego statek.

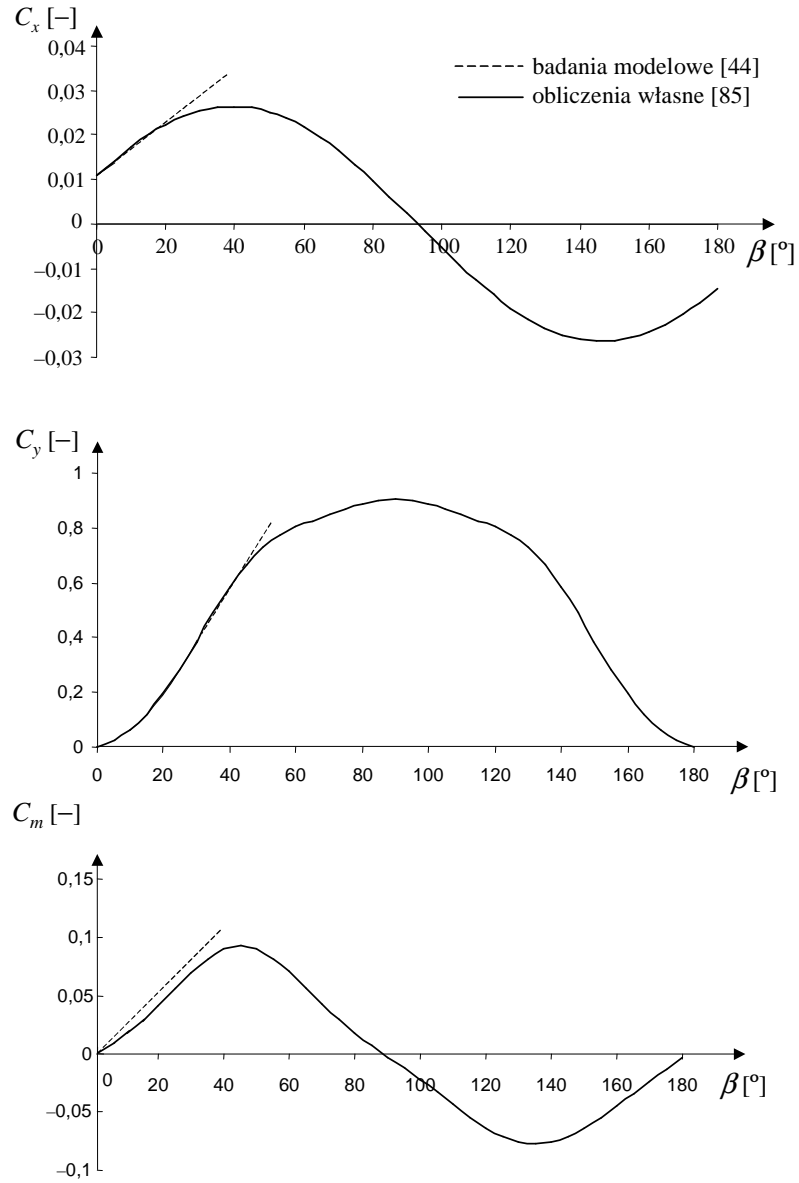
W literaturze znajdują się różne empiryczne wzory dla kąta dryfu $\beta = 0^\circ \pm 25^\circ$ [5, 40, 44] lub $\beta = 0^\circ - 360^\circ$ [22, 85], opracowane na podstawie badań basenowych wielu modeli statków, z których można obliczyć wartości współczynników $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$, $C_m(\beta)$. W pracy [85], dla kierunków zdefiniowanych na rysunku 5.1, współczynniki C_x, C_y, C_m mają następującą postać:

$$\begin{aligned} C_x &= 0,075 \sin \left(\left(180^\circ - \arcsin \frac{C_{x0}}{0,075} \right) \left(1 - \frac{\beta}{k_x} \right) \right), \\ C_y &= 0,5 C_1 \sin 2\beta \cos \beta + C_2 \sin^2 \beta + C_3 \sin^4 2\beta, \\ C_m &= m_1 \sin 2\beta + m_2 \sin \beta + m_3 \sin^3 2\beta + m_4 \sin^4 2\beta, \end{aligned} \quad (5.3)$$

gdzie:

$C_{x0}, k_x, C_1, C_2, C_3, m_1, m_2, m_3, m_4$ są współczynnikami uzależnionymi od parametrów kadłuba statku, a powierzchnia S w tej metodzie jest równa $S = L \cdot T \cdot \sigma$ (T – zanurzenie statku, σ – współczynnik redukcyjny dla bocznej, podwodnej powierzchni kadłuba).

Przykładowe wartości współczynników $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$ i $C_m(\beta)$ przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Współczynniki oporu statku K1 dla prędkości $V = 8,4$ m/s podczas ruchu z kątem dryfu
 Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń według [85] oraz badań modelowych [44].

Występujący w pierwszym równaniu (5.3) współczynnik C_{x_0} oblicza się z oporu na wodzie spokojnej dla ruchu prostoliniowego bez kąta dryfu:

$$C_{x_0} = \frac{C_R(V)}{\frac{1}{2} \rho_w S}, \quad (5.4)$$

gdzie $C_R(V)$ jest współczynnikiem oporu dla danego statku płynącego ruchem prostoliniowym bez kąta dryfu, zdefiniowanym w następujący sposób:

$$C_R(V) = \frac{R_T}{V^{m(V)}}, \quad (5.5 \text{ a})$$

$$R_T = C_R(V) \cdot V^{m(V)}, \quad (5.5 \text{ b})$$

gdzie:

R_T – opór statku na wodzie spokojnej dla ruchu prostoliniowego, bez kąta dryfu, obliczany np. z metody Holtropa-Mennena [37] lub Hollenbacha [35], lub zmierzony podczas badań modelowych,

$m(V)$ – wykładnik, którego wartość zależy od typu i wielkości kadłuba statku.

Współczynnik $C_R(V)$, zdefiniowany wzorem (5.5 a), nie ma wartości stałej (rys. 5.3) i może być określony na podstawie badań modelowych danego statku i zależy od jego prędkości.

Dla statku płynącego ruchem prostoliniowym, kąt dryfu $\beta = 0^\circ$, współczynnik C_x redukuje się do postaci:

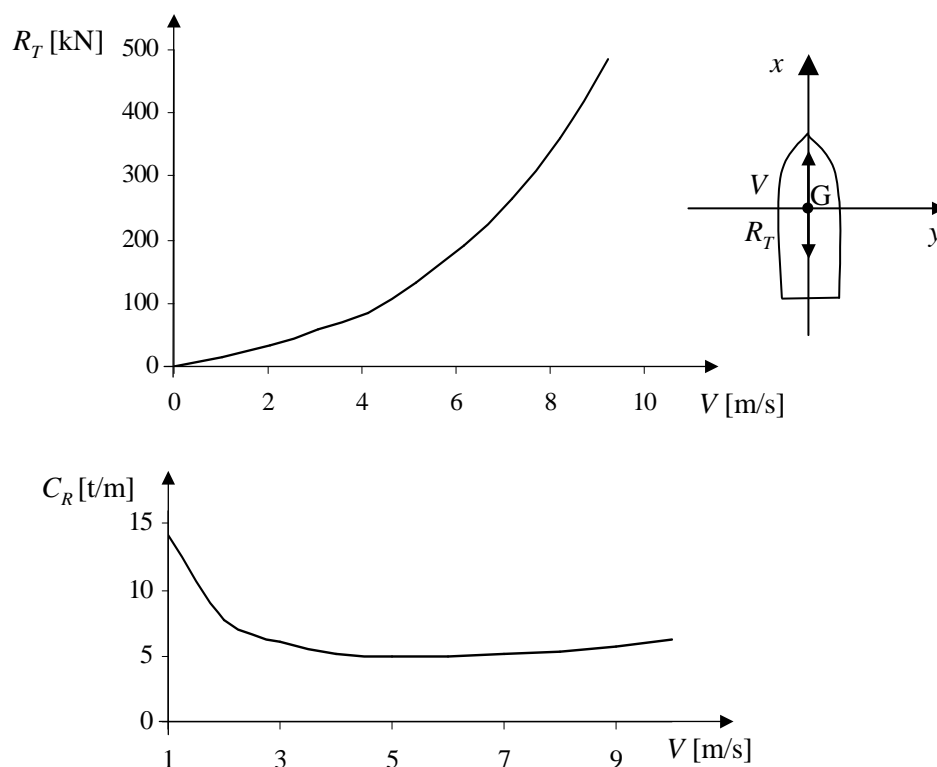
$$C_x = C_{x0} = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho_w S V^{m(V)}} \Big|_{\text{dla } \beta=0}, \quad (5.6)$$

stąd wzdłużną składową R_x oporu z uwzględnieniem kąta dryfu można zapisać w postaci:

$$R_x = R_T C_x^*(\beta), \quad (5.7)$$

gdzie $C_x^*(\beta)$ jest współczynnikiem wpływu kąta dryfu β na opór R_x statku (podczas ruchu z kątem dryfu).

Przykładowe charakterystyki oporu R_T i współczynnika $C_R(V)$ przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Przykładowe charakterystyki $R_T(V)$ i $C_R(V)$ dla statku K1

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń według publikacji [36].

gdzie:

$$\begin{aligned} V_x &= V \cos \beta, \quad V_y = -V \sin \beta - \text{składowe bezwzględnej prędkości statku,} \\ V_C &- \text{prędkość prądu powierzchniowego,} \\ \beta_C &= \gamma_C - \psi, \end{aligned} \quad (5.12)$$

β_C – kierunek prądu względem statku,
 γ_C – geograficzny kierunek prądu powierzchniowego, ($\gamma_C = 0^\circ$ – prąd płynie w kierunku północnym, $\gamma_C = 90^\circ$ – prąd płynie w kierunku wschodnim),
 ψ – geograficzny kurs statku ($\psi = 0^\circ$ – kurs północny, $\psi = 90^\circ$ – kurs wschodni).

Jeżeli prędkość prądu $V_C = 0$, to równania (5.8) redukują się do równań (5.1).

5.4. Dodatkowy opór od wiatru

Średnie siły oddziaływania wiatru na pływący statek obliczyć można ze wzorów zawartych w publikacjach [4, 67]:

$$\begin{aligned} R_{xA} &= -\frac{1}{2} \rho_A S_x V_{RA}^2 C_{Ax}(\beta_{RA}), \\ R_{yA} &= \frac{1}{2} \rho_A S_y V_{RA}^2 C_{Ay}(\beta_{RA}), \\ M_{zA} &= \frac{1}{2} \rho_A S_y L V_{RA}^2 C_{Am}(\beta_{RA}), \end{aligned} \quad (5.13)$$

gdzie:

ρ_A – gęstość powietrza,
 S_x, S_y – rzuty powierzchni nadwodnej części statku (odpowiednio: od dziobu i boczna) na płaszczyznę owręza i symetrii,
 L – długość statku,
 V_{RA} – względna średnia prędkość wiatru (rys. 5.5),
 $C_{Ax}, C_{Ay}, C_{Am}(\beta_{RA})$ – współczynniki oporu aerodynamicznego nadwodnej powierzchni statku, uzależnione od względnego kierunku wiatru (β_{RA}),
 β_{RA} – względny kierunek wiatru (rys. 5.5).

$$V_{RA} = \sqrt{V_{RAx}^2 + V_{RAy}^2}, \quad (5.14)$$

$$V_{RAx} = V_A \cos \beta_A - V, \quad (5.15)$$

$$V_{RAy} = V_A \sin \beta_A,$$

$$\beta_A = \gamma_A - \psi + 180^\circ, \quad (5.16)$$

β_A – kierunek wiatru względem statku ($\beta_A = 0^\circ$ – wiatr od rufy statku, $\beta_A = 90^\circ$ – wiatr na LB statku),

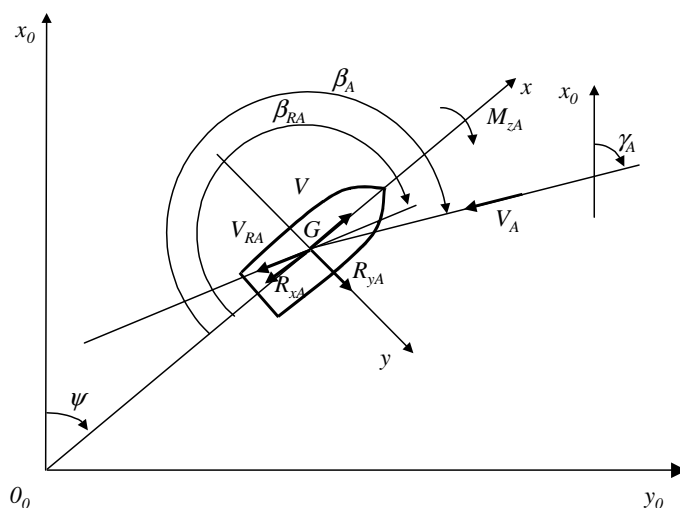
$$\beta_{RA} = \arctg \frac{-V_{RAy}}{V_{RAx}}, \quad (5.17)$$

gdzie:

V_A – średnia prędkość wiatru,

γ_A – geograficzny kierunek wiatru, ($\gamma_A = 0^\circ$ – wiatr północny, $\gamma_A = 90^\circ$ – wiatr wschodni),

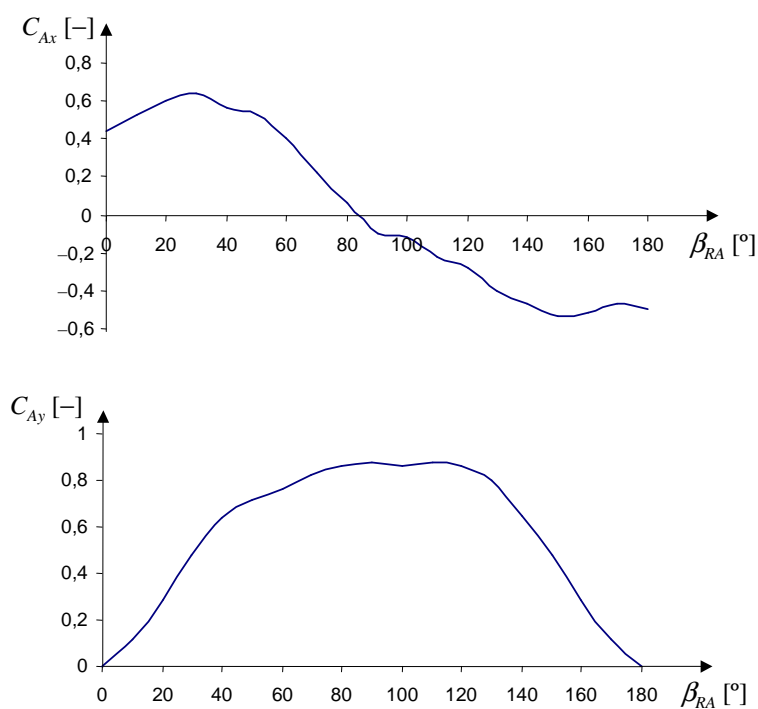
ψ – kurs geograficzny statku (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Układy współrzędnych, prędkości oraz kierunki statku i wiatru

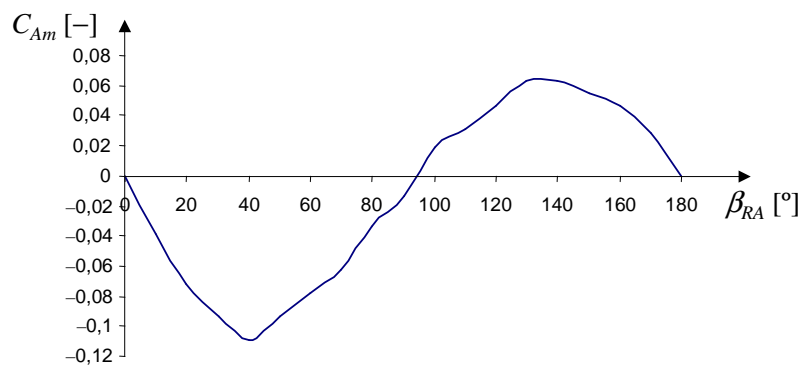
Źródło: opracowanie własne.

Przykładowe wartości współczynników oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} pokazano na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Współczynniki oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} dla statku K1

Źródło: obliczenia własne na podstawie publikacji [6].



Rys. 5.6. Współczynniki oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} dla statku K1 (cd.)

W równaniach (5.13) pominięto kąt dryfu β statku, ponieważ będzie on miał małą wartość i w minimalnym stopniu będzie wpływał na względny kierunek wiatru β_{RA} , a tym samym na siły oddziaływania wiatru.

W równaniach (5.13) siła R_{xA} jest dodatkowym oporem od wiatru, natomiast siła R_{yA} i moment M_{zA} mogą wywoływać dryf i zmianę kursu statku, do którego równoważenia trzeba używać urządzeń sterowych (od urządzeń sterowych będzie wtedy dodatkowy opór R_{xR}).

W równaniach (5.13), jak i na rysunku 5.5 przyjęto, że jeżeli statek płynie pod wiatr, to oddziaływanie wiatru jest dodatkowym oporem, jeżeli wiatr jest od rufy statku, to oddziaływanie wiatru powoduje zmniejszenie całkowitego oporu.

5.5. Dodatkowy opór od falowania

Średnie siły oddziaływania nieregularnej fali (średnie falowe siły dryfu) na płynący statek można obliczyć ze wzorów zawartych w publikacji [67]:

$$\begin{aligned}
 R_{xW} &= 2\rho_w g \frac{B^2}{L} \int_0^\infty C_{wx}(\omega/\beta_W, V) S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega, \\
 R_{yW} &= 2\rho_w g \frac{B^2}{L} \int_0^\infty C_{wy}(\omega/\beta_W, V) S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega, \\
 M_{zW} &= 2\rho_w g B^2 \int_0^\infty C_{wm}(\omega/\beta_W, V) S_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega,
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

gdzie:

- ρ_w – gęstość wody,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- B – szerokość statku,

C_{wx} , C_{wy} , $C_{wm}(\omega/\beta_W, V)$ – współczynniki falowej siły dryfu od fali regularnej, uzależnione od kierunku fali względem statku β_W i prędkości statku V , [19, 20, 57],

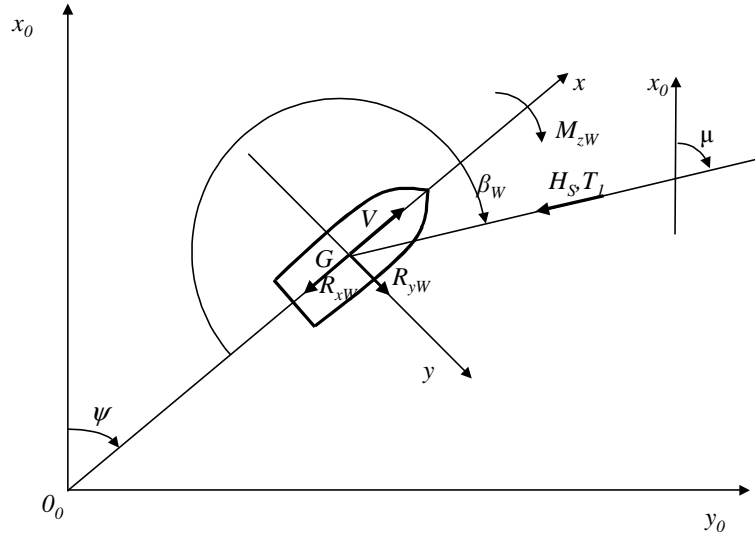
ω – częstość fali regularnej,

β_W – kierunek fali względem statku (rys. 5.7), $\beta_W = 0^\circ$ – fala dochodząca do rufy statku (fala nadążająca), $\beta_W = 90^\circ$ – fala boczna (na LB),

$$\beta_W = \mu - \psi + 180^\circ, \quad (5.19)$$

μ – geograficzny kierunek fali ($\mu = 0^\circ$ – fala północna, $\mu = 90^\circ$ – fala wschodnia),

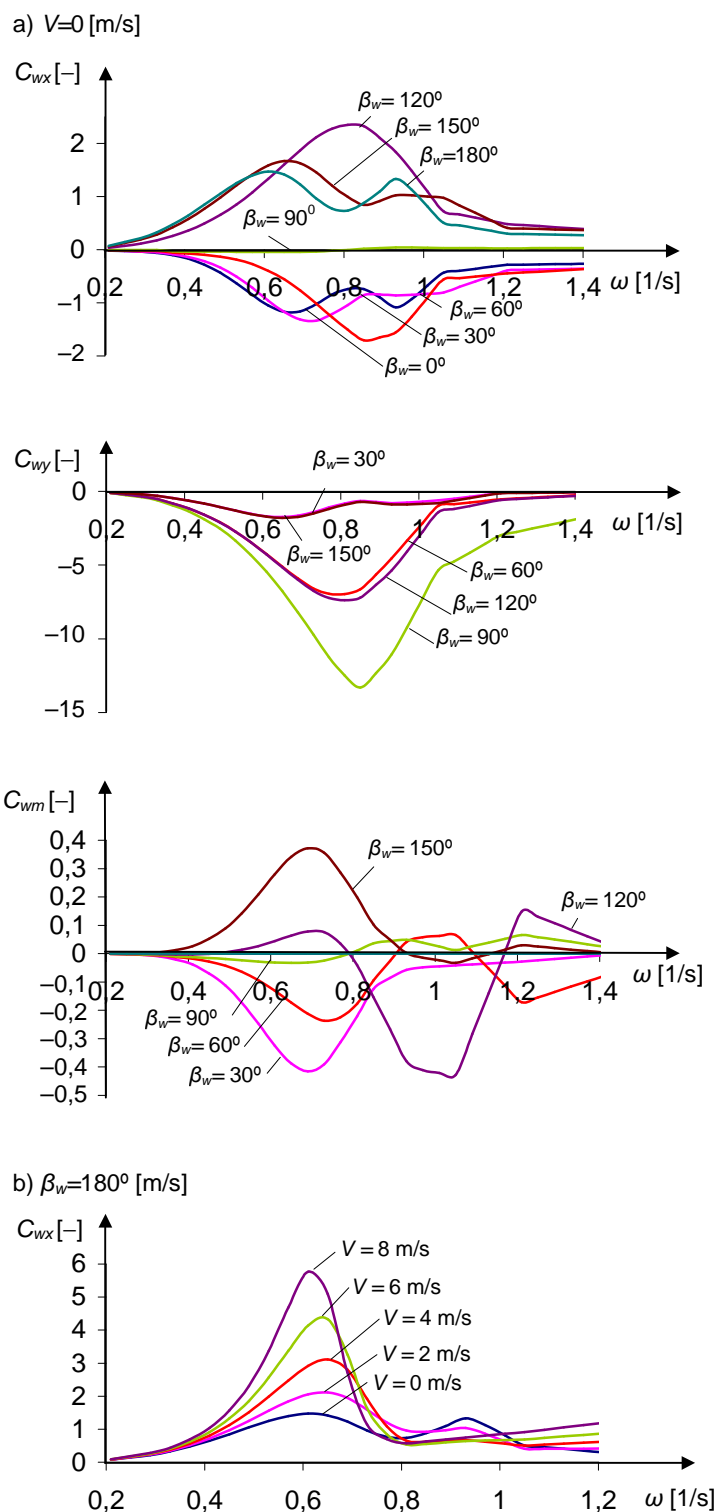
$S_{\zeta\zeta}(\omega)$ – funkcja gęstości widmowej energii falowania (uzależniona od znaczącej wysokości fali H_S i średniego okresu T_I).



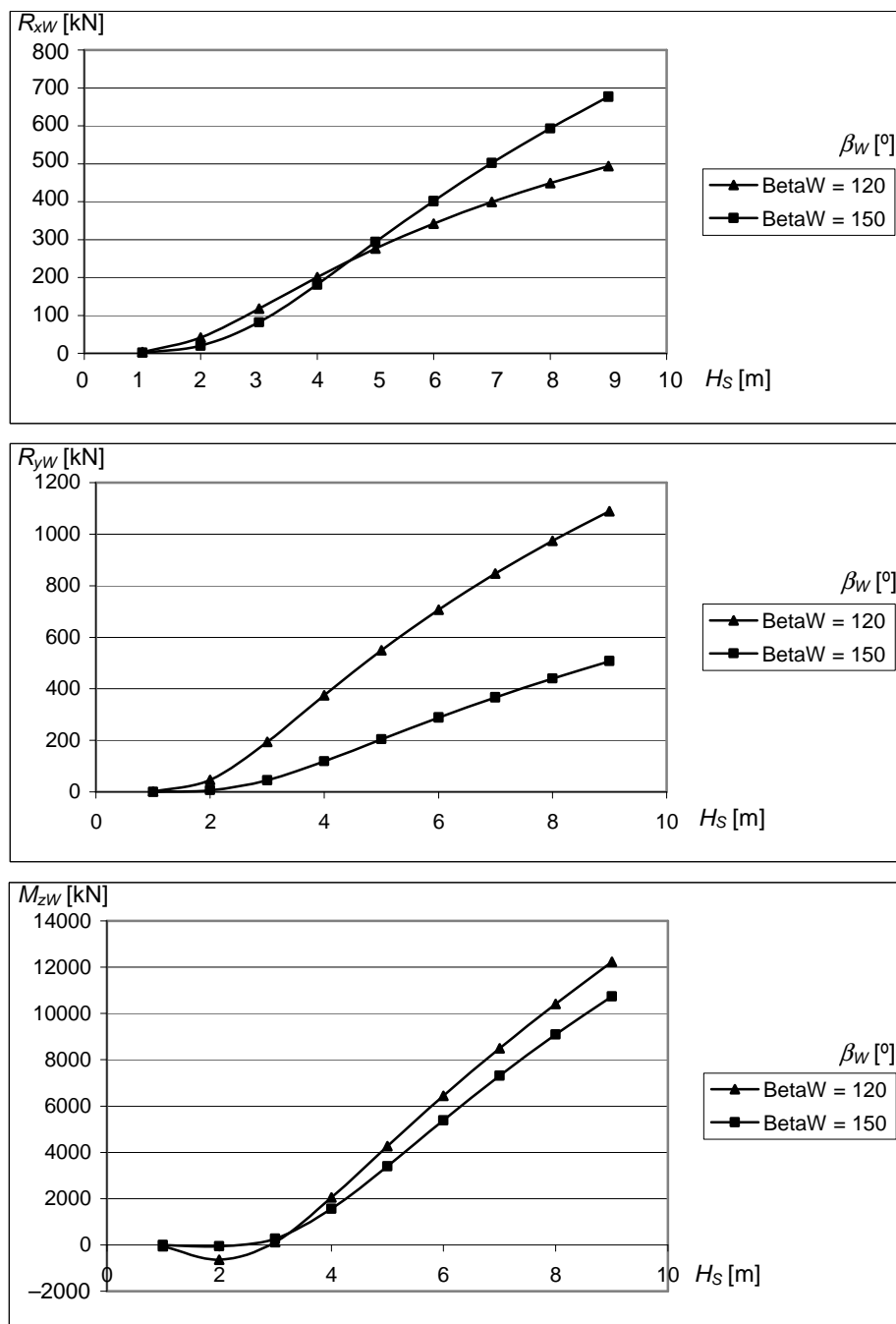
Rys. 5.7. Średnie siły oddziaływania falowania na statek
Źródło: opracowanie własne.

Przykładowe wartości współczynników falowej siły dryfu od fali regularnej pokazano na rysunku 5.8, a siły dodatkowego oporu od fali nieregularnej na rysunku 5.9.

Tak jak w przypadku wiatru, siła R_{xW} jest dodatkowym oporem od fali, natomiast siła R_{yW} i moment M_{zW} mogą wywoływać dryf i zmianę kursu statku.



Rys. 5.8. Współczynniki falowej siły dryfu C_{wx} , C_{wy} , C_{wm} dla statku K1: a) dla różnych kierunków fali względem statku ($V = const$), b) dla różnych kierunków fali względem statku ($V = var$)
 Źródło: obliczenia własne na podstawie publikacji [20].



Rys. 5.9. Siły dodatkowego oporu od fali nieregularnej dla różnych wysokości H_s i kierunku β_w fali względem płaszczyzny symetrii statku dla K1

Źródło: obliczenia własne na podstawie publikacji [20].

5.6. Dodatkowy opór od steru płetwowego

Podczas pływania statku po sfalowanej wodzie, szczególnie gdy na statek skośnie oddziałują wiatr i fala, powstają siły boczne i momenty, które wymuszają zmianę kursu statku oraz powstaje dryf. Aby utrzymać stały kurs statku, należy wychylać płetwę sterową (rys. 5.10), co powoduje powstanie dodatkowego oporu R_{xR} (dodatkowy opór jest obliczany tylko w przy-

padku celowego wychylania steru kompensującego skośne oddziaływanie wiatru i fali, ewentualnie powierzchniowego prądu morskiego).

W literaturze dotyczącej manewrowania statkiem istnieje wiele algorytmów do obliczania sił hydrodynamicznych na sterze płetwowym, np.: [31, 41], w tym i dodatkowego oporu. Według pracy [41], siły na sterze płetwowym mogą być obliczone ze wzorów:

$$\begin{aligned} R_{xR} &= |F_N \sin \delta_R|, \\ R_{yR} &= a_y F_N \cos \delta_R, \\ M_{zR} &= a_z F_N \cos \delta_R, \end{aligned} \quad (5.20)$$

gdzie:

δ_R – kąt wychylenia steru płetwowego (rys. 5.10 – ster wychylony na LB $\rightarrow \delta_R > 0$, ster wychylony na PB $\rightarrow \delta_R < 0$),

a_y – współczynnik wpływu kadłuba na siłę R_{yR} na sterze,

a_z – współczynnik wpływu kadłuba na moment M_{zR} na sterze,

$$a_z = a_y \cdot x_R, \quad (5.21)$$

gdzie:

x_R – odcięta osi steru od środka masy G ($x_R < 0$),

F_N – siła normalna na sterze (rys. 5.10),

$$F_N = \frac{1}{2} \rho_w \frac{6,13\lambda}{\lambda + 2,25} A_R V_R^2 \sin \alpha_R, \quad (5.22)$$

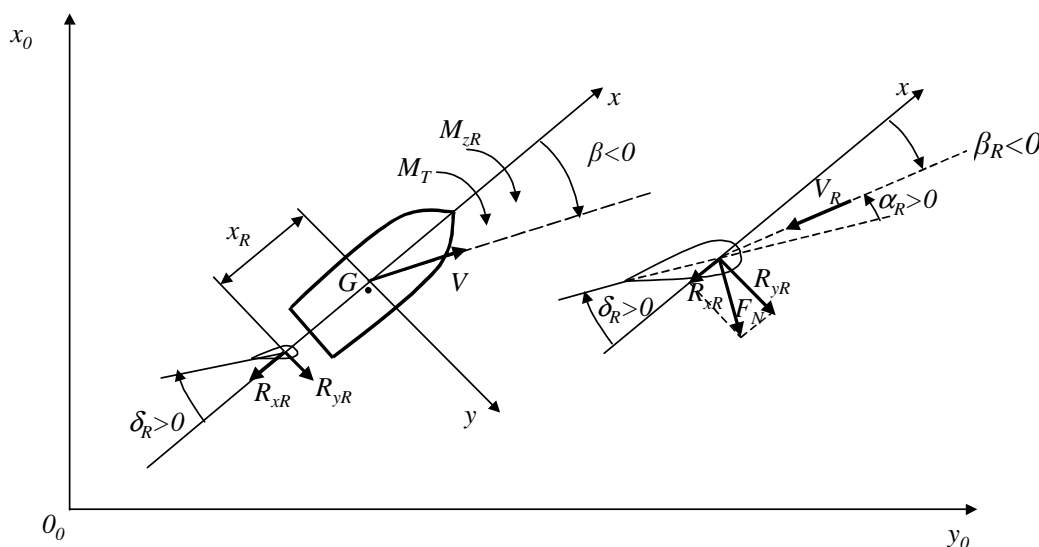
gdzie:

λ – wydłużenie steru,

A_R – powierzchnia steru,

V_R – prędkość dopływu wody do steru (rys. 5.10),

α_R – efektywny kąt natarcia steru (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Siły na sterze płetwowym

Źródło: opracowanie własne.

W wyniku wychylenia steru płetwowego powstaje moment M_{zR} od siły R_{yR} i aby utrzymać zadany kurs statku moment na sterze powinien mieć taką wartość aby równoważyć wypadkowy moment wymuszający od wiatru, fali i moment oporu (łącznie z oddziaływaniem prądu) przy ruchu z kątem dryfu:

$$M_T = -M_{zR} \quad (5.23)$$

gdzie M_T jest całkowitym momentem od środowiska morskiego (wiatr, falowanie i od prądu lub wody, gdy statek płynie z kątem dryfu):

$$M_T = M_{zA} + M_{zW} + M_{zCV} . \quad (5.24)$$

6. MODEL PARAMETRYCZNY CAŁKOWITEGO OPORU STATKU

6.1. Wstęp

W rozdziale 5. przedstawiono matematyczny model oporu całkowitego statku pływającego w rzeczywistych warunkach pogodowych jakie mogą wystąpić na zadanej linii żeglugowej. Ze względu na dowolny kierunek oddziaływania elementów środowiska morskiego (rozdz. 4) na statek, jego ruch może być dowolny, najczęściej statek będzie jednak płynął z pewnym kątem dryfu (wektor prędkości statku nie leży w płaszczyźnie symetrii), co wymaga wychylenia płetwy sterowej, aby utrzymać zadany kurs statku. W tej sytuacji wypadkowy opór statku będzie miał trzy składowe – opór wzdłużny (oś „x”), opór boczny (oś „y”) oraz moment obracający statek wokół pionowej (osi „z”). Wyznaczenie wszystkich składników oporu całkowitego (równania (3.2 i 3.3)) oraz trzech składowych dla każdego składnika może być realizowane na podstawie:

- obliczeń wykorzystujących różne metody przybliżone, półempiryczne lub CFD (numeryczna mechanika płynów),
- badań doświadczalnych w basenie modelowym.

W obu przypadkach należy znać dość dużo parametrów opisujących geometrię nie tylko kadłuba, ale także nadbudówek lub steru płetwowego (w przypadku obliczeń numerycznych CFD, a w przypadku badań modelowych musi być znana pełna geometria kadłuba). Takie podejście jest więc nieprzydatne na etapie projektowania wstępnego, gdy projektant dysponuje tylko podstawowymi parametrami projektowymi statku – rozdział 3.6.

W tym rozdziale przedstawiono model parametryczny całkowitego oporu statku w rzeczywistych warunkach pogodowych, uzależniony tylko od podstawowych parametrów kadłuba, znanych na etapie projektowania wstępnego.

6.2. Modele funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej

Do określenia oporu statku na wodzie spokojnej płynącego z kątem dryfu β – równanie (5.1) – niezbędne są współczynniki $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$ i $C_m(\beta)$, dane równaniami (5.3). Gdy statek płynie ruchem prostoliniowym bez kąta dryfu, wtedy opór wzdłużny R_x dany jest równaniem (5.5). Poszukiwanie funkcji aproksymującej przeprowadzono dla:

- oporu R_T powstającego podczas ruchu prostoliniowego bez kąta dryfu,
- współczynników oporu $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$, $C_m(\beta)$ dla statku płynącego z kątem dryfu.

6.2.1. Opór statku w ruchu prostoliniowym (bez kąta dryfu)

6.2.1.1. Określenie zakresu badanych parametrów statków transportowych

Podczas wstępnych badań stwierdzono, że typ statku ma istotny wpływ na końcową postać wzoru aproksymacyjnego. Opracowane dwie bazy danych (statki wzorcowe – baza B – (zbudowane w Stoczni Szczecińskiej) i statki zbudowane – baza A – (parametry z literatury)) zostały podzielone na odpowiednie podzbiory zawierające dane statków tego samego typu: masowce, kontenerowce, zbiornikowce i statki LNG. Poszukiwanie wzorów aproksymacyjnych prowadzono oddzielnie dla poszczególnych czterech typów statków, których parametry techniczno-eksploatacyjne zawarte są w bazie A (rozdz. 3.4).

Podstawę do budowy funkcji aproksymacyjnej stanowiły obliczenia oporu dla statków z bazy A metodą Holtropa-Menenna. Nie wszystkie statki z bazy A spełniały kryteria dla metody Holtropa-Menenna – te statki odrzucono.

Ostatecznie do dalszych badań wykorzystano:

- masowce – 41 statków,
- kontenerowce – 56 statków,
- zbiornikowce – 32 statki,
- statki LNG – 14 statków.

Zakres badanych parametrów (zmienne objaśniające) dla analizowanych grup typów statków przedstawiono w tabelach 6.1–6.4.

Tabela 6.1. Zakres badanych parametrów dla masowców

Wartość	Parametr								
	L_{WL} [m]	B [m]	T [m]	C_B [–]	C_{WP} [–]	C_P [–]	∇ [m ³]	V [m/s]	L/B [–]
Max.	330	60	18	0,88	0,91	0,87	288 000	8	7,2
Min.	104	18	7	0,73	0,83	0,74	9770	2	5,4

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.2. Zakres badanych parametrów dla kontenerowców

Wartość	Parametr								
	L_{WL} [m]	B [m]	T [m]	C_B [–]	C_{WP} [–]	C_P [–]	∇ [m ³]	V [m/s]	L/B [–]
Max.	380	56	15	0,77	0,85	0,78	214580	13,5	8,9
Min.	125	22	6	0,64	0,77	0,65	12420	2,5	5,4

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.3. Zakres badanych parametrów dla zbiornikowców

Wartość	Parametr								
	L_{WL} [m]	B [m]	T [m]	C_B [–]	C_{WP} [–]	C_P [–]	∇ [m ³]	V [m/s]	L/B [–]
Max.	330	60	21,5	0,88	0,92	0,89	335200	10,5	8,2
Min.	81	9,4	4,6	0,67	0,79	0,68	3945	1,5	5,4

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.4. Zakres badanych parametrów dla statków LNG

Wartość	Parametr								
	L_{WL} [m]	B [m]	T [m]	C_B [-]	C_{WP} [-]	C_P [-]	∇ [m ³]	V [m/s]	L/B [-]
Max.	338	55	12	0,78	0,86	0,79	170320	10	9,4
Min.	97	17	6	0,68	0,80	0,69	7320	2	5,5

Źródło: opracowanie własne.

6.2.1.2. Hipotezy robocze dla oporu R_T

Przykładową charakterystykę oporu R_T na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym, bez kąta dryfu, w funkcji prędkości V przedstawiono na rysunku 5.3.

Na podstawie doświadczenia, intuicji oraz analizy wpływu parametrów projektowych na wielkość oporu utworzono następujące postacie modelu funkcji aproksymującej:

$$\text{Model 1. } R_T = f(L_{WL}, B, T, C_B, V, \nabla). \quad (6.1)$$

$$\text{Model 2. } R_T = f(L_{WL}V^2, BV^2, TV^2, C_BV^2, \nabla V^2). \quad (6.2)$$

Dla modelu drugiego (6.2) zmienne objaśniające to odpowiednie iloczyny parametru projektowego i kwadratu prędkości, np. $x_1 = L_{WL}V^2 = L_{WL} \cdot V^2$.

Ze względu na przebieg zmienności wartości oporu, na wodzie spokojnej, w ruchu prostoliniowym w stosunku do parametrów projektowych stanowiących zmienne zależne (objaśniające) rozpatrzono również modele, w których zmienną objaśnianą przyjęto w postaci $y = R_T/V^2$:

$$\text{Model 3. } R_T/V^2 = f(L_{WL}, B, T, C_B, \nabla). \quad (6.3)$$

$$\text{Model 4. } R_T/V^2 = f(L_{WL}, B, T, C_B, \nabla, V, V^2). \quad (6.4)$$

Wymienione powyżej modele wybrano z grupy wielu różnych rozpatrywanych wariantów jako najlepsze do dalszej analizy.

Po wstępnym wyborze parametrów projektowych (zmiennych objaśniających), mających wpływ na opór statku na wodzie spokojnej (zmienna objaśniana), sprawdzono, dla danych wejściowych dla każdego typu statku, jaki wpływ ma poszczególny parametr projektowy oraz pary parametrów na opór – jego zmienność, przybliżoną zależność funkcyjną oraz stopień korelacji.

Po przeprowadzeniu obliczeń dla wszystkich modeli najlepsze efekty (dokładność) otrzymano dla modelu czwartego. Inne modele parametryczne oporu statku na wodzie spokojnej przedstawione zostały w publikacji [120].

Na podstawie analiz wpływu poszczególnych parametrów projektowych na zmienność oporu na wodzie spokojnej szczegółowa postać funkcji aproksymującej jest następująca:

$$\frac{R_T}{V^2} = a_0 + a_1 \cdot L_{WL}^3 + a_2 \cdot B^2 \ln(B) + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot \ln^2(C_B) + a_5 \cdot \nabla \ln(\nabla) + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2. \quad (6.5)$$

Przeanalizowano również różne wersje tego modelu, a uproszczona wersja ma postać:

$$\frac{R_T}{V^2} = a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2. \quad (6.6)$$

W tabeli 6.5 zamieszczono porównanie dokładności dopasowania analizowanych modeli i ich błędów estymacji dla masowców.

W podobny sposób przeprowadzono badanie funkcji aproksymacyjnej dla pozostałych typów statków – model czwarty był w każdym przypadku najlepszy. Ostateczna funkcja aproksymująca opór R_T dla wszystkich typów statków na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym ma postać:

$$R_T = (a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2) \cdot V^2, \quad (6.7)$$

natomiast wartości wyestymowanych parametrów z równania (6.7) oraz uzyskane dokładności dla poszczególnych typów statków zawiera tabela 6.6.

Tabela 6.5. Porównanie dokładności dopasowania analizowanych modeli i ich błędów estymacji dla masowców

Model	Skorygowany R^2	Błąd standardowy estymacji
Model 1.	0,859	207,527
Model 2.	0,997	45,023
Model 3.	0,987	1,510
Model 4.	0,990	1,392
Model 4. uproszczony	0,990	1,383

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.6. Wartości parametrów dla funkcji aproksymującej dla poszczególnych typów statków

Typ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Masowce	0,431942	-0,026994	0,108922	-0,308537	5,93474	0,000214	0,635562	-0,10157
Kontenerowce	-10,1163	0,0103	0,3544	-0,0320	17,4097	3,65E-05	-1,8620	0,1391
Zbiornikowce	-10,0598	0,0272	0,2910	-0,1247	12,9654	0,00004	-0,9491	0,0613
Statki LNG	-9,08923	0,02803	0,18527	-0,33747	15,69090	0,00007	-0,67414	0,02604

Typ	Skorygowany R^2	Standardowy błąd estymacji
Masowce	0,990	1,383
Kontenerowce	0,987	0,697
Zbiornikowce	0,996	0,542
Statki LNG	0,995	0,538

Źródło: opracowanie własne.

6.2.1.3. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla oporu R_T

Testy statystyczne prowadzone były dla statków zawartych w bazie A (rozdz. 3.4), a merytoryczne dla statków z bazy B.

Wyniki testów statystycznych (testu istotności oraz globalnego testu F) dla analizowanego modelu pokazane są na podsumowaniu estymacji współczynników modelu regresji w tabelach 6.7 i 6.8.

Tabela 6.7. Podsumowanie estymacji współczynników regresji dla uproszczonego modelu czwartego dla masowców

N = 410	R = 0,99498412, R ² = 0,98999340, Skoryg. R ² = 0,98981915 F(7,402) = 5681,6, p < 0,0000, Błąd std. estymacji: 1,3834					
	BETA	błąd st. BETA	B	błąd st. B	t(402)	poziom p
W. wolny			0,431942	2,287914	0,18879	0,850350
LWL	-0,107516	0,026158	-0,026994	0,006567	-4,11022	0,000048
B	0,073767	0,023764	0,108922	0,035090	3,10408	0,002044
T	-0,071612	0,020253	-0,308537	0,087258	-3,53592	0,000454
CB	0,012135	0,005608	5,934741	2,742435	2,16404	0,031050
DISV	1,090451	0,021753	0,000214	0,000004	50,12796	0,000000
V	0,078592	0,032317	0,635562	0,261341	2,43193	0,015454
V2	-0,124839	0,032344	-0,101567	0,026315	-3,85970	0,000132

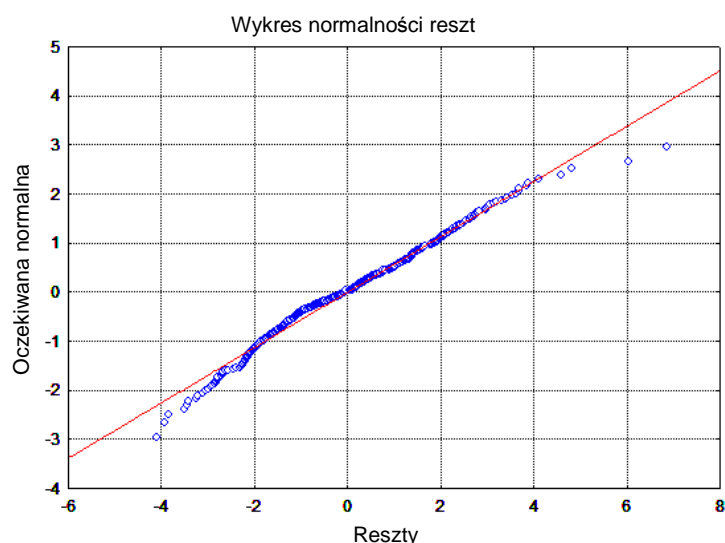
Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w programie STATISTICA.

Tabela 6.8. Podsumowanie estymacji współczynników regresji dla uproszczonego modelu czwartego dla kontenerowców

N = 560	R = 0,99375603, R ² = 0,98755105, Skoryg. R ² = 0,98739318 F(7,552) = 6255, 6, p < 0,0000, Błąd std. estymacji: 0,69687					
	BETA	błąd st. BETA	B	błąd st. B	t(552)	poziom p
W. wolny			-10,1163	0,892637	-11,3330	0,000000
LWL	0,111920	0,021120	0,0103	0,001948	5,2993	0,000000
B	0,470418	0,022471	0,3544	0,016928	20,9347	0,000000
T	-0,009743	0,014776	-0,0320	0,048486	-0,6594	0,509921
CB	0,117641	0,006601	17,4097	0,976867	17,8220	0,000000
DISV	0,291655	0,025607	0,0000	0,000003	11,3896	0,000000
V	-0,852931	0,028709	-1,8620	0,062647	-29,7092	0,000000
V2	1,041237	0,028732	0,1391	0,003839	36,2400	0,000000

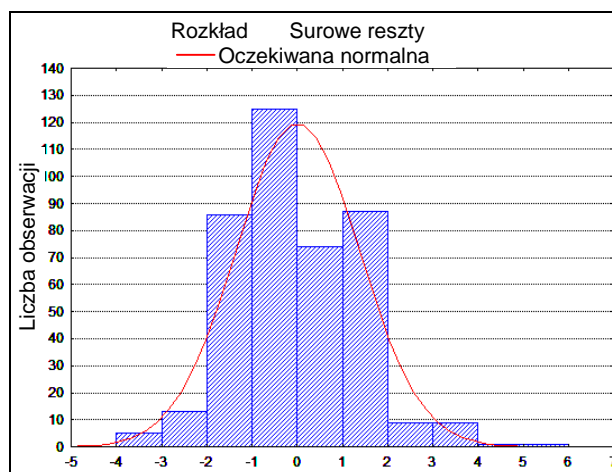
Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w programie STATISTICA.

Na rysunkach 6.1 i 6.2 pokazano wykres normalności i histogram reszt dla wybranego modelu dla masowców.



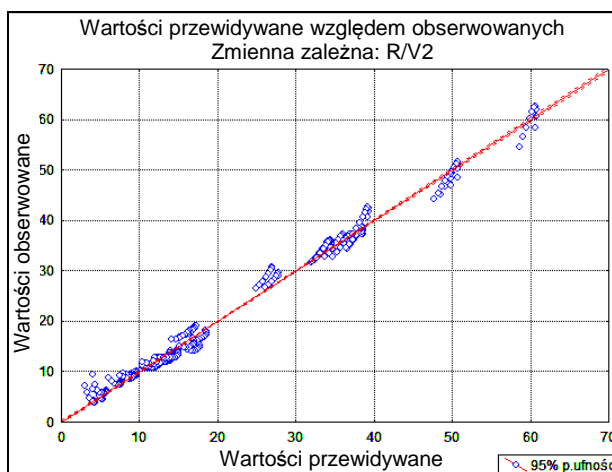
Rys. 6.1. Wykresy normalności reszt dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla masowców

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

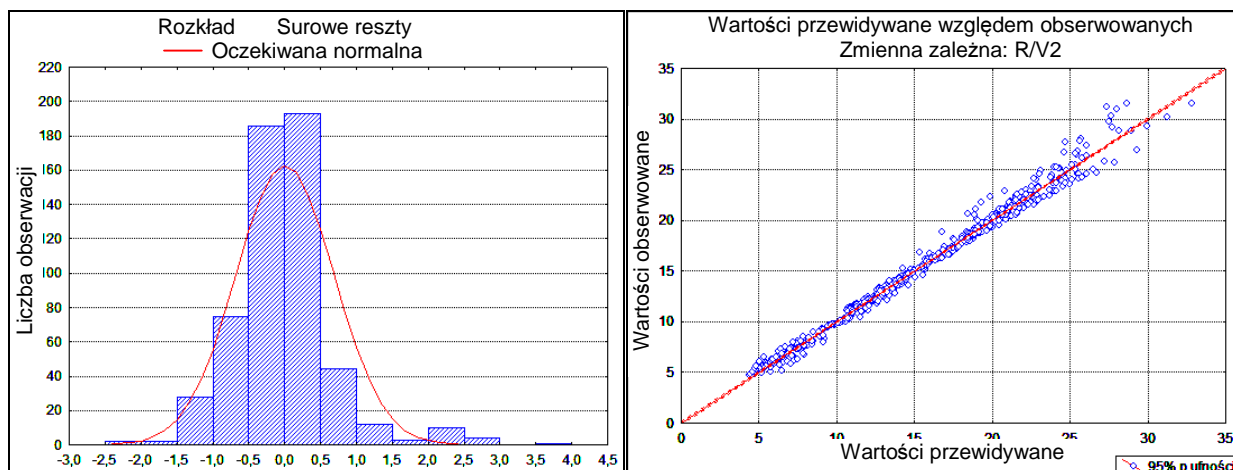


Rys. 6.2. Histogram reszt dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla masowców
 Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

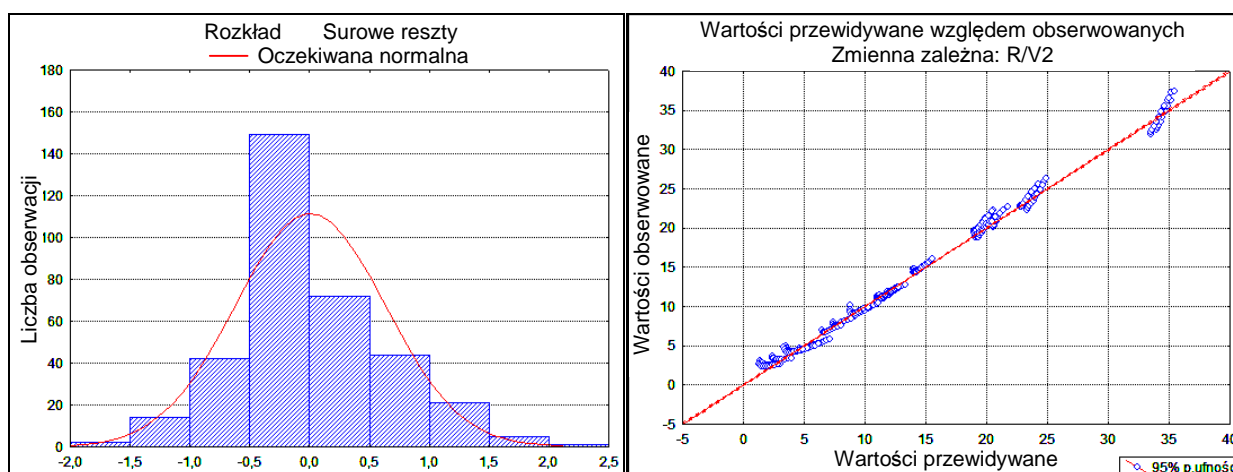
Przykładowy rozkład wartości przewidywanych (uzyskanych z modelu) w stosunku do wartości obserwowanych (wartości wzorcowych) dla wybranego modelu dla masowców przedstawiono na rysunku 6.3. Dla pozostałych typów statków histogramy reszt oraz rozkłady wartości przewidywanych względem wartości obserwowanych zamieszczono na rysunkach 6.4–6.6.



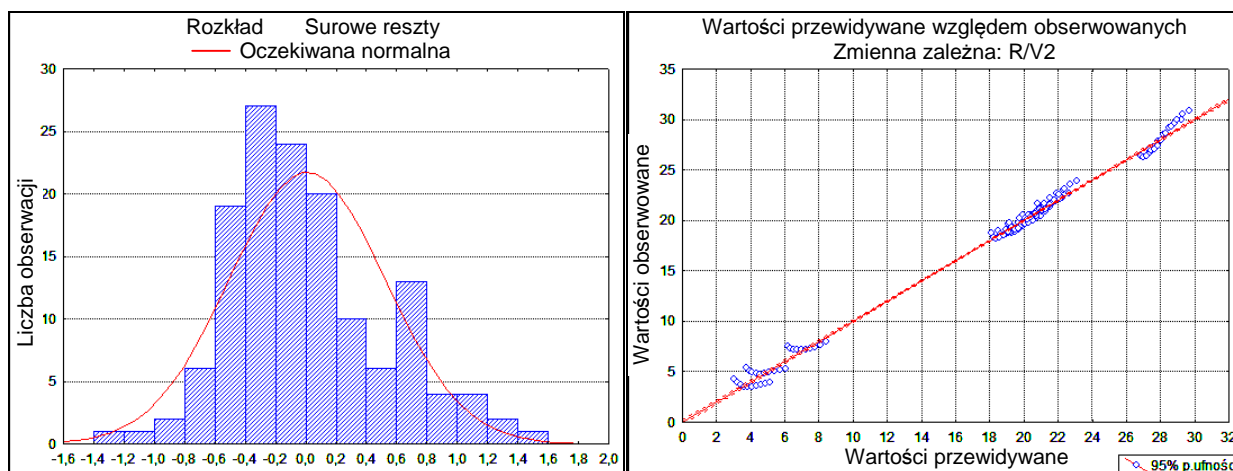
Rys. 6.3. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla masowców
 Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń wykonanych w programie STATISTICA.



Rys. 6.4. Histogram reszt oraz rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla kontenerowców
 Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń wykonanych w programie STATISTICA.



Rys. 6.5. Histogram reszt oraz rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla zbiornikowców
 Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń wykonanych w programie STATISTICA.

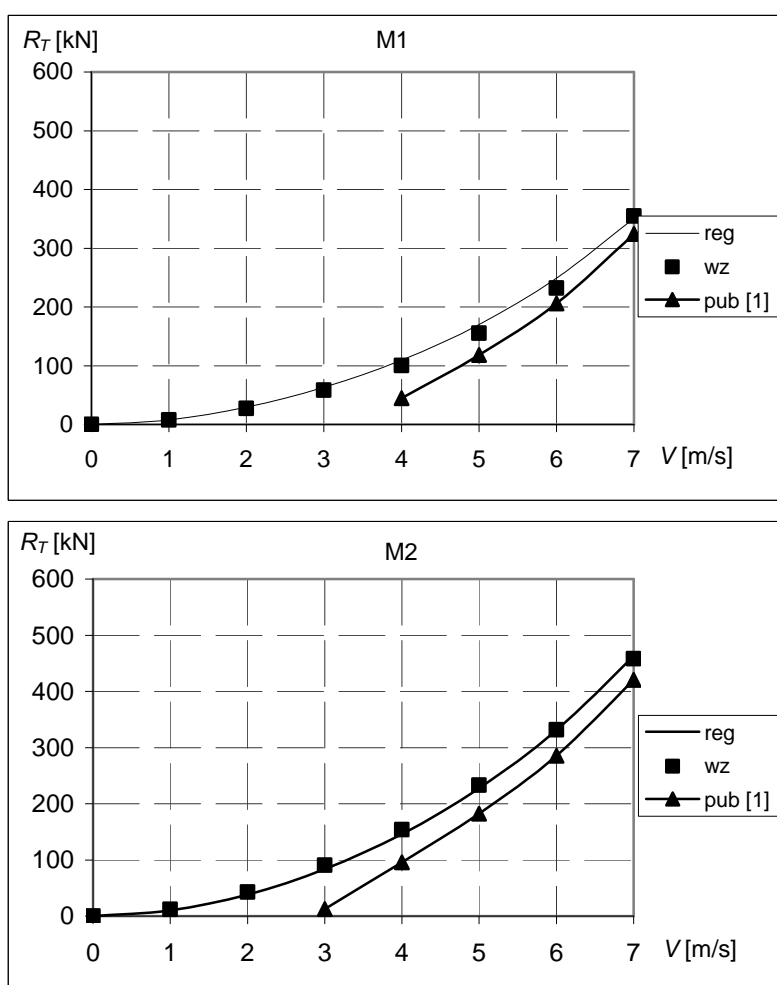


Rys. 6.6. Histogram reszt oraz rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla wybranego modelu funkcji aproksymującej opór statku dla statków LNG
 Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń wykonanych w programie STATISTICA.

Weryfikację merytoryczną modelu przeprowadzono, porównując wyniki uzyskane z modelu regresji z wynikami obliczeń dla statków wzorcowych z bazy B i ewentualnie z wynikami badań modelowych tych statków.

Na rysunkach 6.7 i 6.8 przedstawiono porównanie wyników obliczeń dla masowców i kontenerowców oporu statku na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym za pomocą aproksymacji (model czwarty uproszczony) z wartościami wzorcowymi, obliczonymi metodą Holtropa-Mennena oraz z wynikami otrzymanymi z metody aproksymacyjnej opisanej w pracy [1].

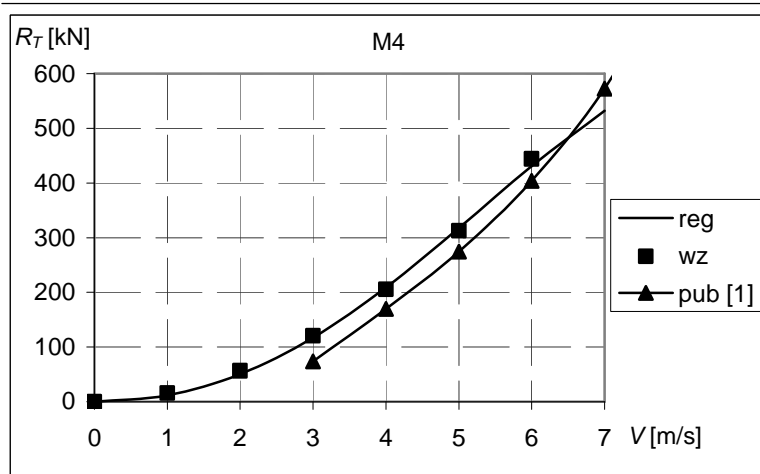
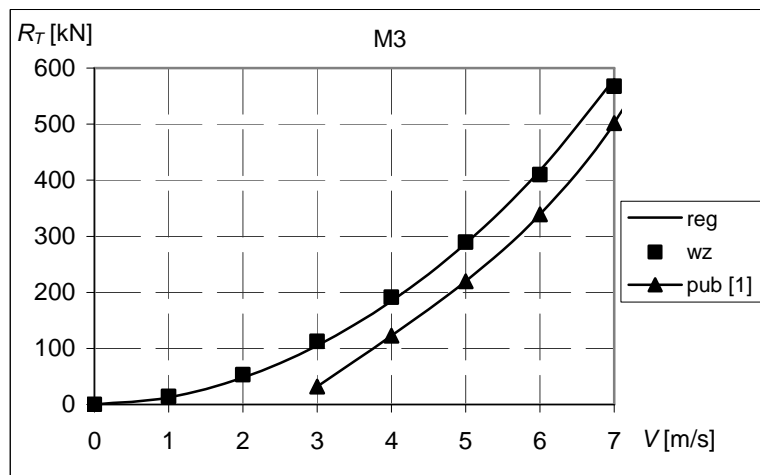
Z rysunków 6.7 i 6.8 wynika, że opracowana nowa funkcja aproksymująca opór R_T na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym jest prosta i jednocześnie bardzo dokładna oraz lepsza od innych metod aproksymacyjnych przedstawionych w literaturze, np. [1].



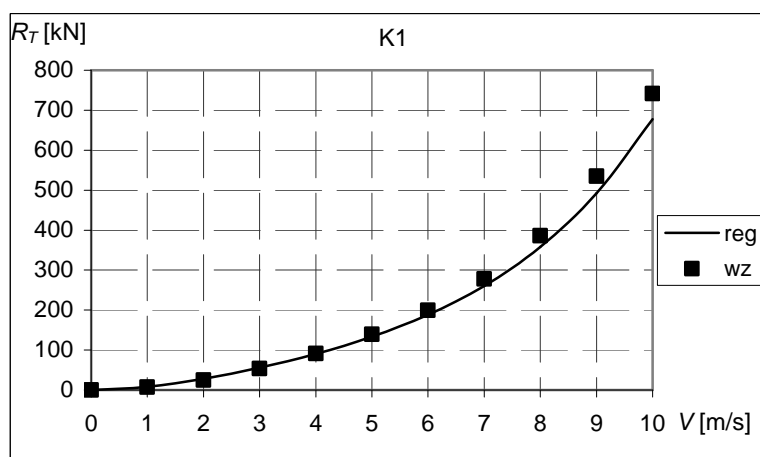
Objaśnienia: reg – wyniki uzyskane z aproksymacji – wzór (6.7),
 wz – wyniki obliczeń metodą Holtropa-Mennena,
 pub [1] – wyniki obliczeń wykonane metodą z publikacji [1].

Rys. 6.7. Porównanie wyników uzyskanych z wybranej postaci funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym (wzór 6.7) z wartościami wzorcowymi, obliczonymi metodą Holtropa-Mennena oraz z publikacji [1] dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



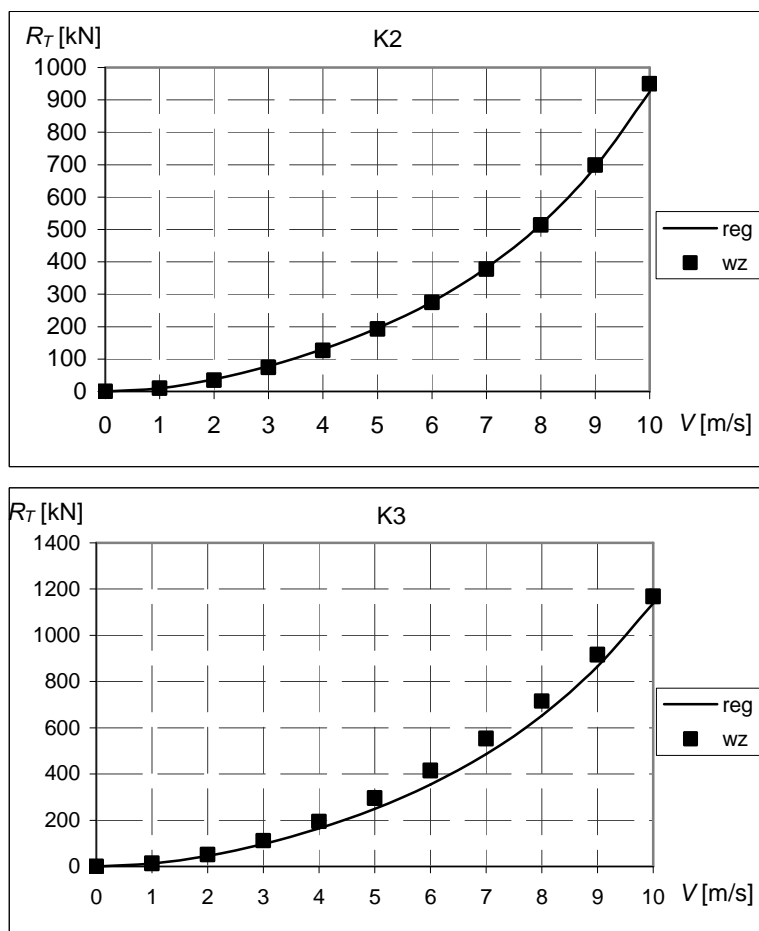
Rys. 6.7. Porównanie wyników uzyskanych z wybranej postaci funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym (wzór 6.7) z wartościami wzorcowymi, obliczonymi metodą Holtropa-Mennena oraz z publikacji [1] dla masowców (cd.)



Objaśnienia: reg – wyniki uzyskane z aproksymacji – wzór (6.7),
wz – wyniki obliczeń metodą Holtropa-Mennena.

Rys. 6.8. Porównanie wyników uzyskanych z wybranej postaci funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym (wzór 6.7) z wartościami wzorcowymi, obliczonymi metodą Holtropa-Mennena dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne.



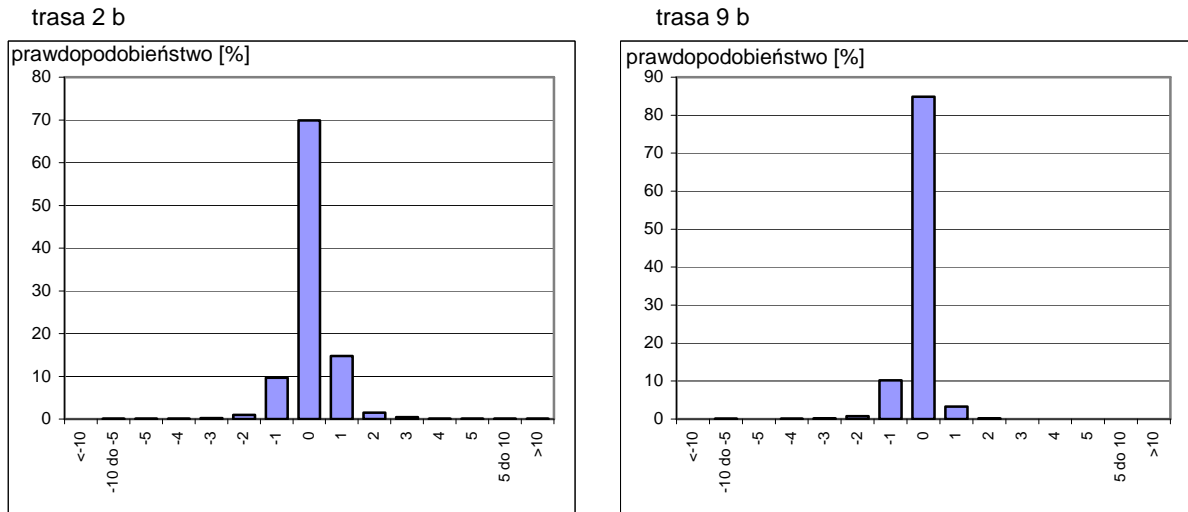
Rys. 6.8. Porównanie wyników uzyskanych z wybranej postaci funkcji aproksymującej opór statku na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym (wzór 6.7) z wartościami wzorcowymi, obliczonymi metodą Holtropa-Mennena dla kontenerowców (cd.)

6.2.2. Modele aproksymujące opór statku na wodzie spokojnej podczas ruchu z kątem dryfu

Powstający, przy skośnym oddziaływaniu środowiska morskiego na statek, kąt dryfu powoduje duży wzrost oporu (rys. 5.2).

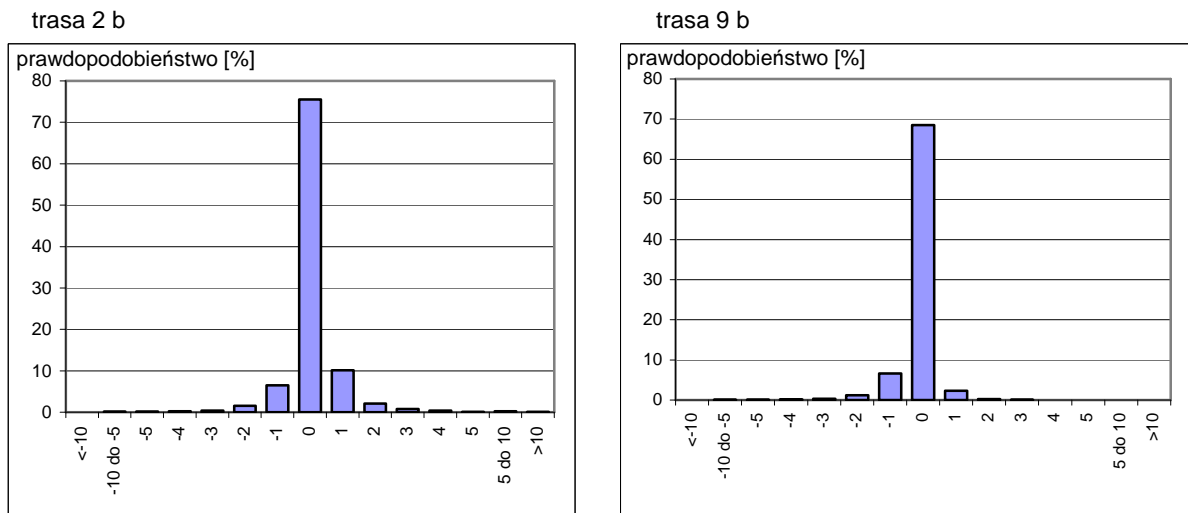
Na podstawie algorytmu przedstawionego w pracach [97–99] dla statków wzorcowych (baza B) wykonano obliczenia kąta dryfu podczas żeglugi na przykładowych trasach, w średnich statystycznych warunkach pogodowych zamieszczonych w atlasach [32 i 33].

Na rysunkach 6.9 i 6.10 przedstawiono rozkład kąta dryfu dla kontenerowca K1 i masowca M1 na trasach 2 b oraz 9 b (tabela 11.1, s. 169). Z rozkładów tych wynika, że kąt dryfu najczęściej zawiera się w przedziale od -5° do 5° , natomiast dla większych wartości jest bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia.



Rys. 6.9. Rozkład kąta dryfu dla kontenerowca K1 na trasach 2 b i 9 b

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.10. Rozkład kąta dryfu dla masowca M1 na trasach 2 b i 9 b

Źródło: opracowanie własne.

Do obliczenia składowych sił oporu statku podczas ruchu na wodzie spokojnej z kątem dryfu β równanie (5.1) – rozdział 5.3 – niezbędna jest powierzchnia S oraz współczynniki $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$, $C_m(\beta)$.

Rzut podwodnej powierzchni bocznej statku S na płaszczyznę symetrii (PS) został aproksymowany wyrażeniem:

$$S = L \cdot T \cdot \sigma, \quad (6.8)$$

gdzie $\sigma = 0,975$ dla wszystkich typów statków. Natomiast współczynniki $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$ i $C_m(\beta)$ aproksymowano odpowiednimi funkcjami.

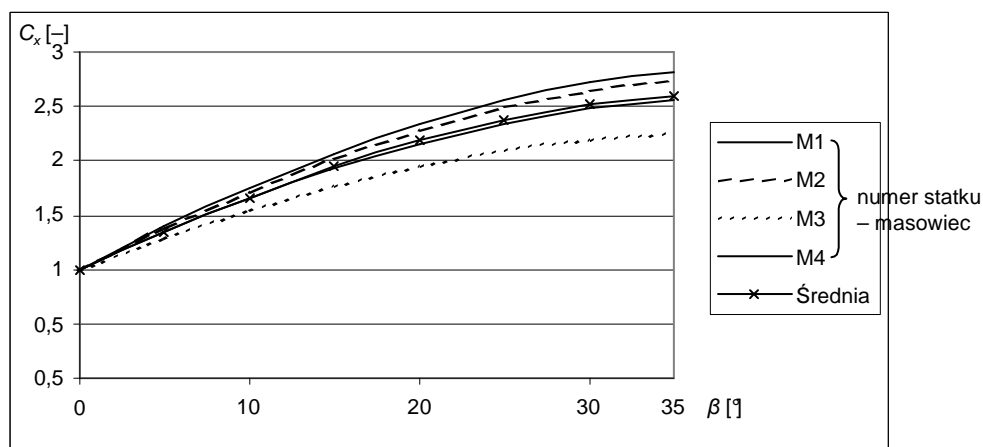
6.2.2.1. Hipotezy robocze dla współczynników oporu $C_x(\beta)$, $C_y(\beta)$, $C_m(\beta)$

Analiza współczynnika $C_x(\beta)$ dla statków z bazy B wykazuje, że zależność $C_x^*(\beta)$ (rozdz. 5.3., rys. 5.2) od prędkości statku jest niewielka i można ją pominąć. Także w zakresie małych kątów dryfu β współczynnik $C_x^*(\beta)$ mało zależy od wielkości statku.

Na rysunkach 6.11 i 6.12 pokazano współczynnik $C_x^*(\beta)$ dla masowców i kontenerowców z bazy B dla ich prędkości kontraktowych.

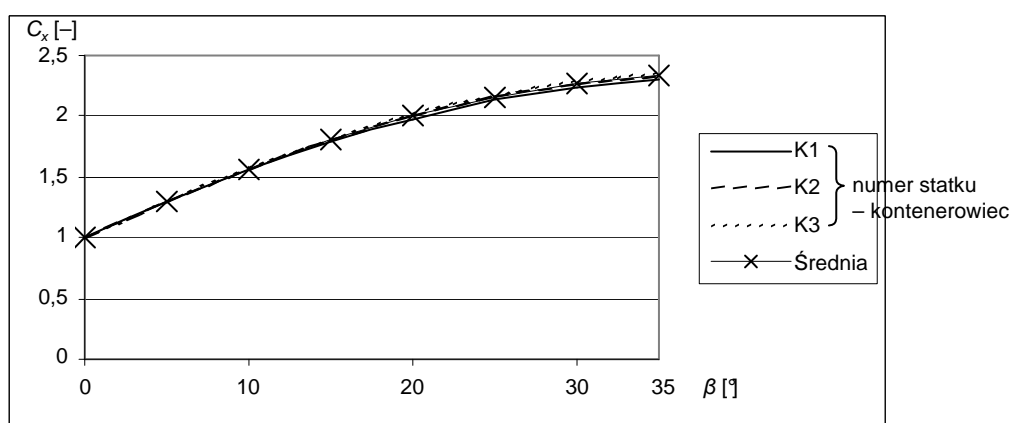
Funkcja aproksymacyjna współczynnika $C_x^*(\beta)$ będzie niezależna od prędkości V dla każdego typu statku (rys. 6.11 i 6.12).

Ostateczne funkcje aproksymacyjne współczynnika $C_x^*(\beta)$ dla różnych typów statków zawarto w tabeli 6.9.



Rys. 6.11. Współczynnik $C_x^*(\beta)$ w funkcji kąta dryfu dla masowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.12. Współczynnik $C_x^*(\beta)$ funkcji kąta dryfu dla kontenerowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

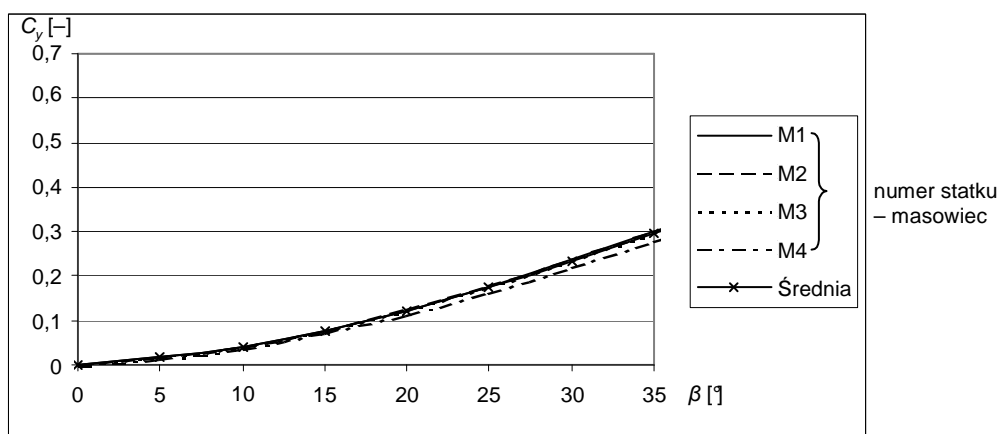
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.9. Postacie funkcji aproksymacyjnej dla współczynnika $C_x^*(\beta)$ dla różnych typów statków

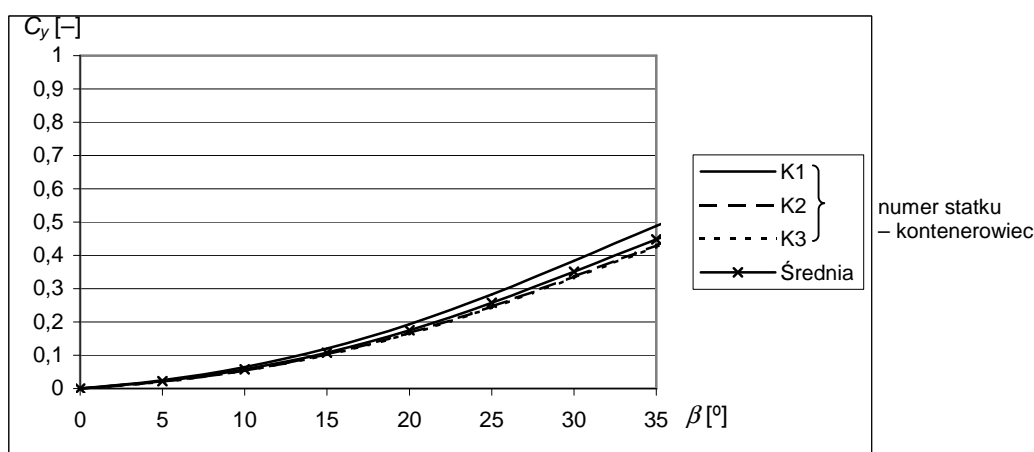
Typ	Funkcja
Masowce	$C_x^*(\beta) = -0,00085\beta^2 + 0,07715\beta + 1$
Kontenerowce	$C_x^*(\beta) = -0,0008\beta^2 + 0,0661\beta + 1$
Zbiornikowce	$C_x^*(\beta) = -0,0008\beta^2 + 0,0681\beta + 1$
Statki LNG	$C_x^*(\beta) = -0,0009\beta^2 + 0,0736\beta + 1$

Źródło: opracowanie własne.

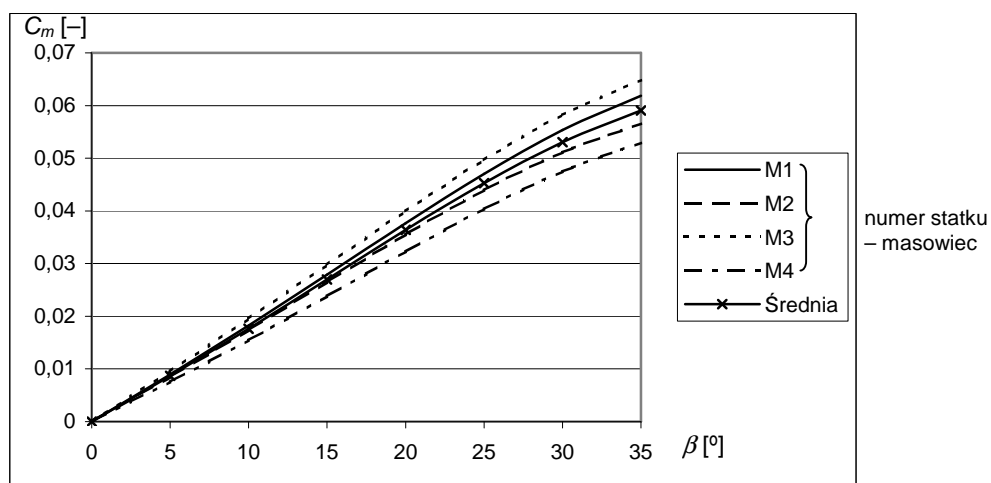
Podobnie przeprowadzono badania współczynników $C_y(\beta)$ oraz $C_m(\beta)$ dla statków z bazy B i stwierdzono, że i na te współczynniki prędkość statku ma pomijalnie mały wpływ (rys. 6.13–6.16).

Rys. 6.13. Współczynnik $C_y(\beta)$ w funkcji kąta dryfu dla masowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne.

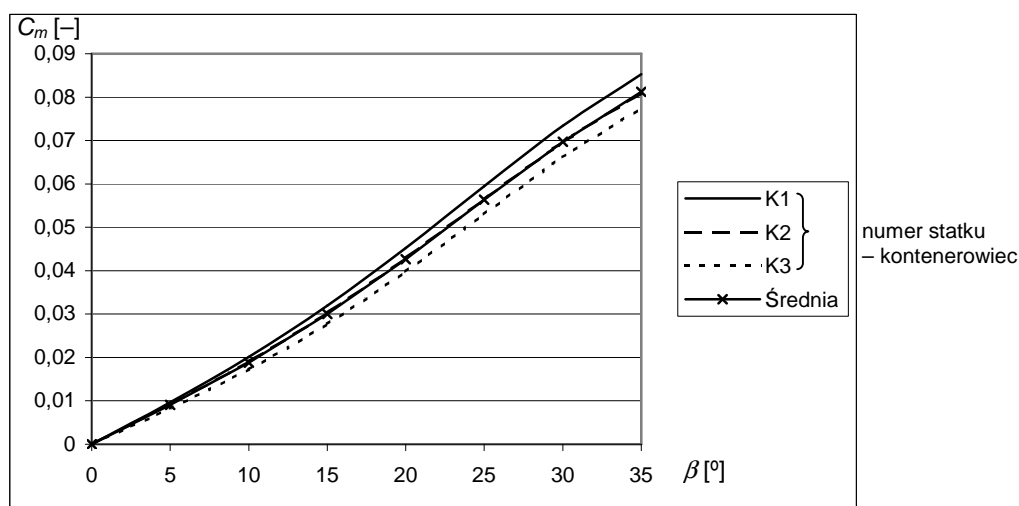
Rys. 6.14. Współczynnik C_y w funkcji kąta dryfu dla kontenerowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.15. Współczynnik $C_m(\beta)$ w funkcji kąta dryfu dla masowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.16. Współczynnik C_m w funkcji kąta dryfu dla kontenerowców (dla prędkości kontraktowej statku) oraz jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne.

Aproksymacje dla współczynników $C_y(\beta)$ oraz $C_m(\beta)$ dla różnych typów statków zawarto odpowiednio w tabelach 6.10 i 6.11.

Tabela 6.10. Postacie funkcji aproksymacyjnej dla współczynnika $C_y(\beta)$ dla różnych typów statków

Typ	Funkcja
Masowce	$C_y(\beta) = 0,000166\beta^2 + 0,002665\beta$
Kontenerowce	$C_y(\beta) = 0,000278\beta^2 + 0,003208\beta$
Zbiornikowce	$C_y(\beta) = 0,0001\beta^2 + 0,0028\beta$
Statki LNG	$C_y(\beta) = 0,0003\beta^2 - 0,002\beta$

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.11. Postacie funkcji aproksymacyjne dla współczynnika $C_m(\beta)$ dla różnych typów statków

Typ	Funkcja
Masowce	$C_m(\beta) = 0,001754\beta$
Kontenerowce	$C_m(\beta) = 0,002251\beta$
Zbiornikowce	$C_m(\beta) = 0,0018\beta$
Statki LNG	$C_m(\beta) = 0,00002\beta^2 + 0,0002\beta - 0,0004$

Źródło: opracowanie własne.

6.2.2.2. Weryfikacja merytoryczna sił oporu na wodzie spokojnej

Końcowa postać funkcji aproksymujących siły oporu i moment na wodzie spokojnej z kątem dryfu dla poszczególnych typów statków jest następująca:

Masowce

$$\begin{aligned}
 R_x &= (a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,00085\beta^2 + 0,07715\beta + 1), \\
 R_y &= \rho_w LTV^2 (8,12 \cdot 10^{-5} \beta^2 + 1,30 \cdot 10^{-3} \beta), \\
 M_z &= 8,55 \cdot 10^{-4} \rho_w TL^2 V^2 \beta.
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Kontenerowce

$$\begin{aligned}
 R_x &= (a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0008\beta^2 + 0,0661\beta + 1), \\
 R_y &= \rho_w LTV^2 (1,36 \cdot 10^{-4} \beta^2 + 1,56 \cdot 10^{-3} \beta), \\
 M_z &= 1,10 \cdot 10^{-3} \rho_w TL^2 V^2 \beta.
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

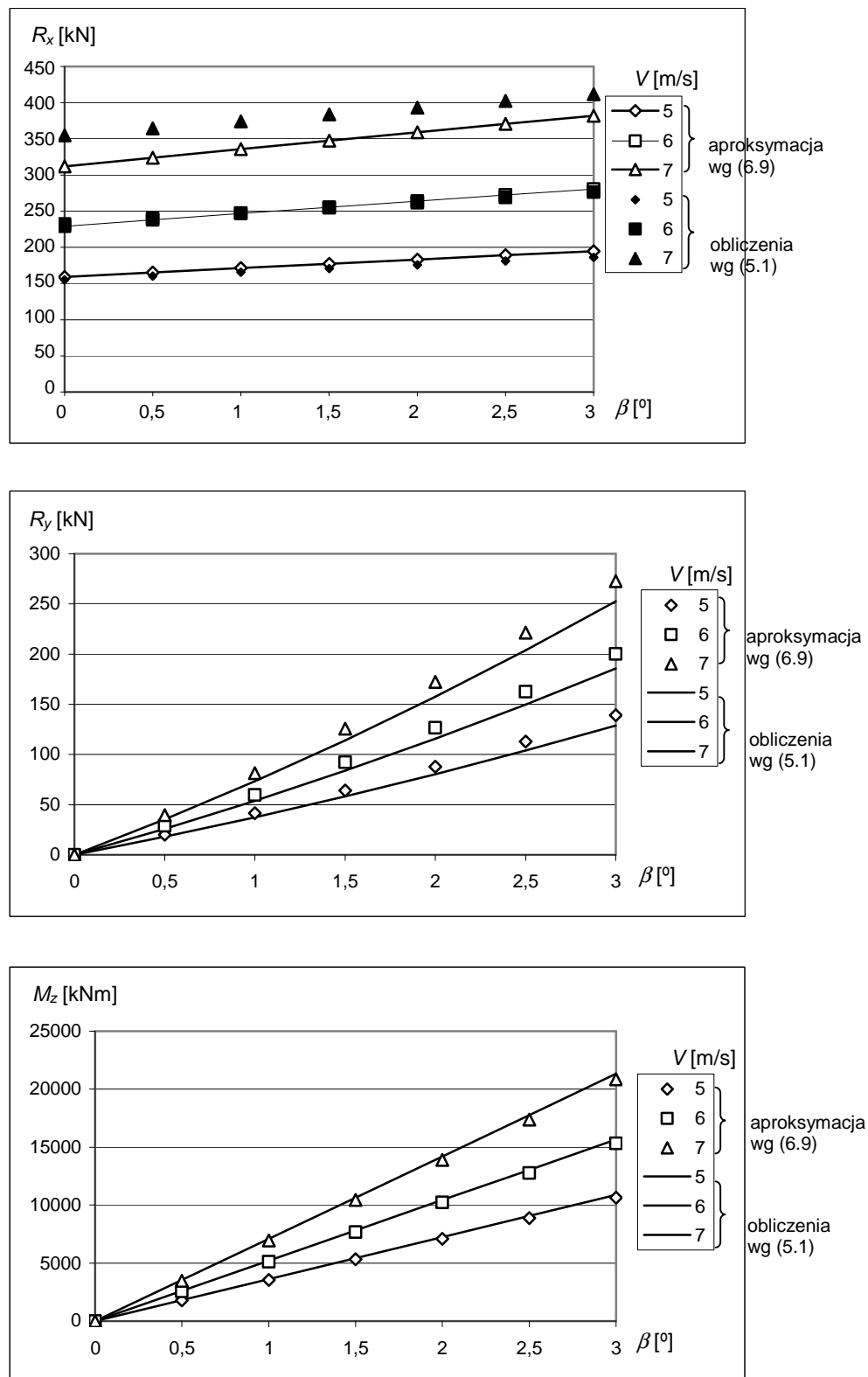
Zbiornikowce

$$\begin{aligned}
 R_x &= (a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0008\beta^2 + 0,0681\beta + 1), \\
 R_y &= \rho_w LTV^2 (4,48 \cdot 10^{-5} \beta^2 + 1,37 \cdot 10^{-3} \beta), \\
 M_z &= 8,78 \cdot 10^{-4} \rho_w TL^2 V^2 \beta.
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

Statki LNG

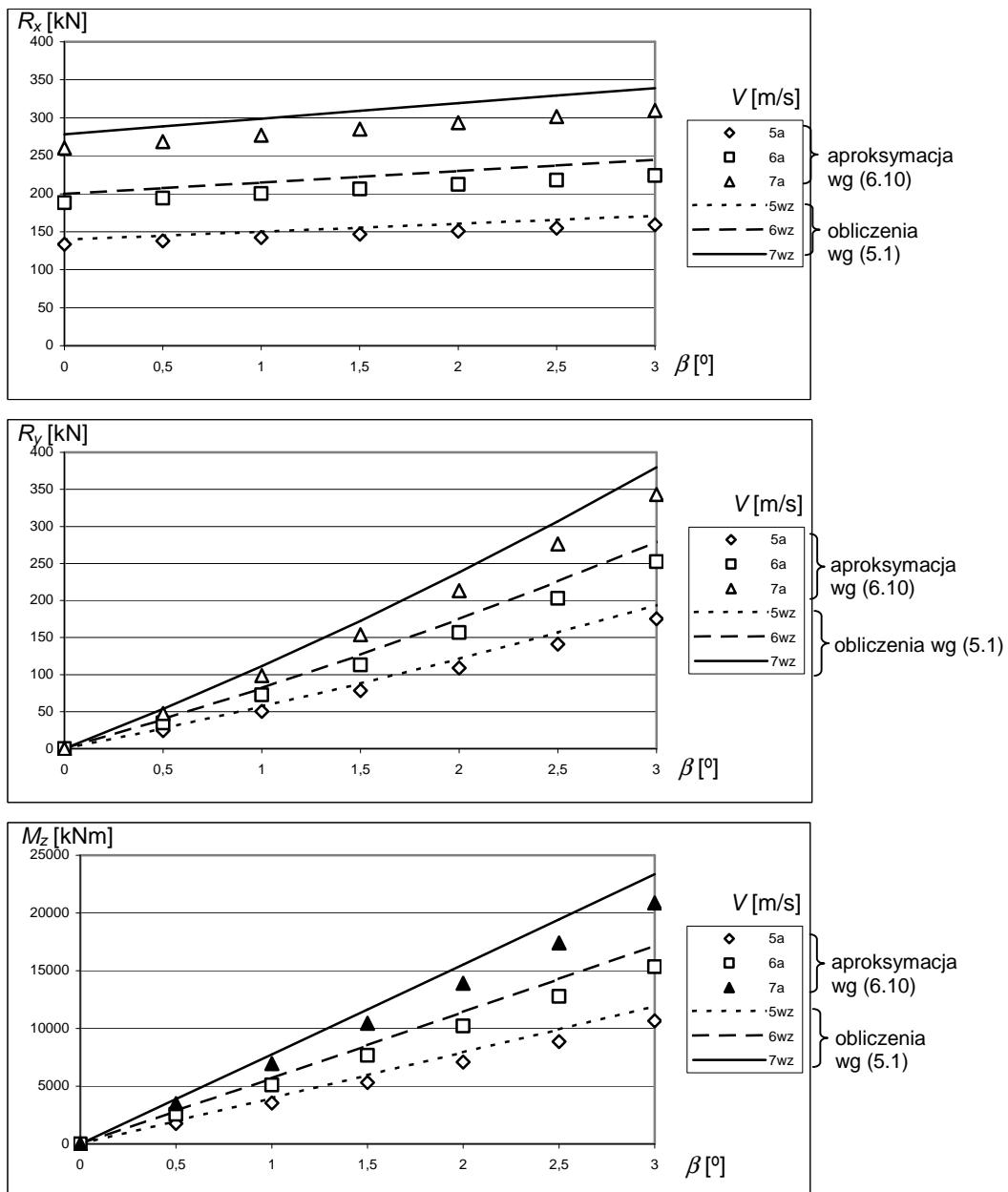
$$\begin{aligned}
 R_x &= (a_0 + a_1 \cdot L_{WL} + a_2 \cdot B + a_3 \cdot T + a_4 \cdot C_B + a_5 \cdot \nabla + a_6 \cdot V + a_7 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0009\beta^2 + 0,0736\beta + 1), \\
 R_y &= \rho_w LTV^2 (1,46 \cdot 10^{-4} \beta^2 - 9,75 \cdot 10^{-4} \beta), \\
 M_z &= \rho_w TL^2 V^2 \cdot (9,75 \cdot 10^{-6} \beta^2 + 9,75 \cdot 10^{-5} \beta + 1,95 \cdot 10^{-4}),
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

gdzie wartości współczynników a_0 – a_7 dla danego typu statku zawarte są w tabeli 6.6. Na wykresach (rys. 6.17 i 6.18) przedstawiono przykładowe wyniki dokładności poszczególnych aproksymacji przy obliczaniu składowych oporów na wodzie spokojnej z uwzględnieniem kąta dryfu dla statków z bazy B.



Rys. 6.17. Siły oporu statku i moment na wodzie spokojnej z uwzględnieniem kąta dryfu dla różnych prędkości statku V – masowiec M1

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.18. Siły oporu statku i moment na wodzie spokojnej z uwzględnieniem kąta dryfu dla różnych prędkości statku V – kontenerowiec K1

Źródło: opracowanie własne.

6.3. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od prądu powierzchniowego

Morski prąd powierzchniowy powoduje zmianę opływu wody wokół kadłuba statku. Od prędkości statku i prędkości prądu powstaje względna prędkość opływu wody V_{RV} (równanie 5.9) oraz względny kąt dryfu β_{RV} (równanie 5.10). Do obliczenia dodatkowego oporu od prądu należy wykorzystać aproksymacje (6.9–6.12), podstawiając w nich zamiast $V \rightarrow V_{RV}$ i zamiast $\beta \rightarrow \beta_{RV}$.

6.4. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od wiatru

Składowe dodatkowego oporu od wiatru opisane są równaniami (5.13). W równaniach tych występują powierzchnie nadwodnej części statku S_x i S_y oraz współczynniki oporu aerodynamicznego $C_{Ax}(\beta_{RA})$, $C_{Ay}(\beta_{RA})$ i $C_{Am}(\beta_{RA})$, gdzie β_{RA} jest względnym kierunkiem wiatru (wzór 5.17). Poszukiwane będą więc funkcje aproksymujące powierzchnie S_x i S_y oraz współczynniki C_{Ax} , C_{Ay} i C_{Am} (rys. 5.6).

Równania (5.13) zostały przepisane do postaci:

$$\begin{aligned} R_{xA} &= -\text{wsp} \cdot S_x(x_1) V_{RA}^2 C_{Ax}(\beta_{RA}), \\ R_{yA} &= \text{wsp} \cdot S_y(x_2) V_{RA}^2 C_{Ay}(\beta_{RA}), \\ M_{zA} &= \text{wsp} \cdot S_y(x_2) L V_{RA}^2 C_{Am}(\beta_{RA}), \end{aligned} \quad (6.13)$$

gdzie $\text{wsp} = \frac{1}{2} \rho_A$, a x_1, x_2 są parametrami statku.

Aproksymowane zostaną więc współczynniki oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} oraz powierzchnie S_x i S_y dla wybranych typów statków.

6.4.1. Modele funkcji aproksymujących nadwodną powierzchnię statku

6.4.1.1. Hipotezy robocze dla powierzchni S_x, S_y

Powierzchnie S_x i S_y dla poszczególnych typów statków z bazy A, za pomocą regresji liniowej, aproksymowano wielomianami zawierającymi tylko podstawowe wymiary statku. Badano zależności powierzchni S_x i S_y w funkcji długości statku L , szerokości B , wyporności ∇ , iloczynu szerokości i zanurzenia $B \cdot T$ oraz iloczynu szerokości i różnicy między wysokością boczną a zanurzeniem $B \cdot (H - T)$. Najlepsze dopasowanie uzyskano dla $S_x = f(\nabla)$ i $S_y = f(\nabla)$.

W tabelach 6.12 i 6.13 przedstawiono postać funkcji aproksymującej powierzchnie S_x, S_y dla najlepszego modelu, dla czterech typów statków. Inne modele aproksymacji powierzchni nadwodnej części statku przedstawione zostały w publikacji [121].

Tabela. 6.12. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x dla różnych typów statków

Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$S_x = 233,71 \cdot \ln(\nabla) - 1879,3$	0,8408
Kontenerowce	$S_x = 467,7 + 0,0093 \cdot \nabla$	0,8795
Zbiornikowce	$S_x = 252,14 \cdot \ln(\nabla) - 2049,4$	0,9043
Statki LNG	$S_x = 515,89 \cdot \ln(\nabla) - 4490,3$	0,8909

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.13. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y dla różnych typów statków

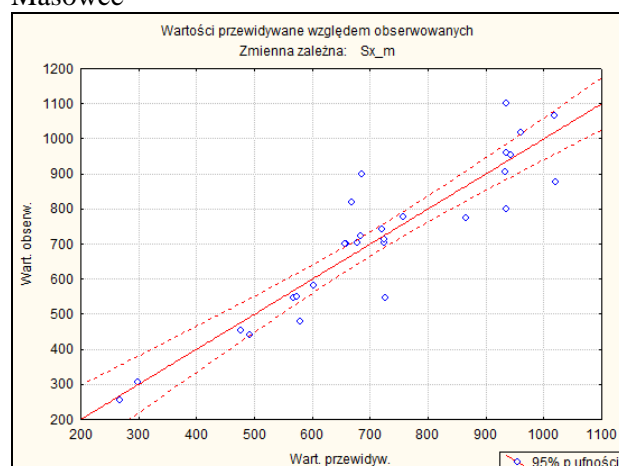
Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$S_y = 895,4 \cdot \ln(\nabla) - 7472,4$	0,8020
Kontenerowce	$S_y = 1848,1 + 0,0628 \cdot \nabla$	0,9299
Zbiornikowce	$S_y = 648,93 \cdot \ln(\nabla) - 4987,2$	0,8760
Statki LNG	$S_y = 2473,8 \cdot \ln(\nabla) - 21947$	0,9174

Źródło: opracowanie własne.

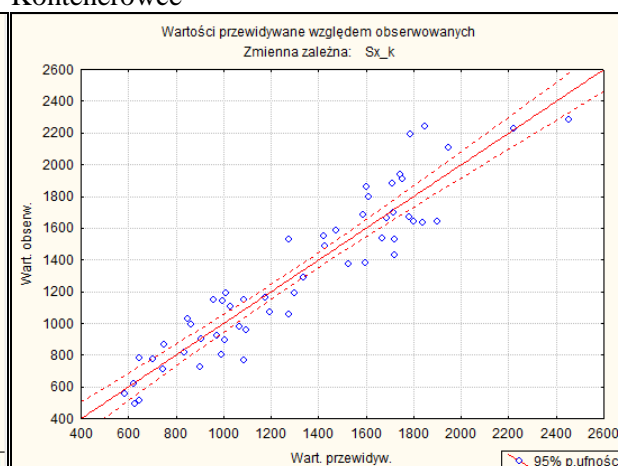
6.4.1.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla powierzchni S_x , S_y

Na rysunkach 6.19 i 6.20 zamieszczono wyniki testów statystycznych (dokładność) uzyskanych aproksymacji (tabele 6.12 i 6.13). Natomiast na rysunkach 6.21–6.28 przedstawiono wartości „wzorcowe” powierzchni S_x i S_y dla poszczególnych typów statków oraz aproksymacje tych powierzchni.

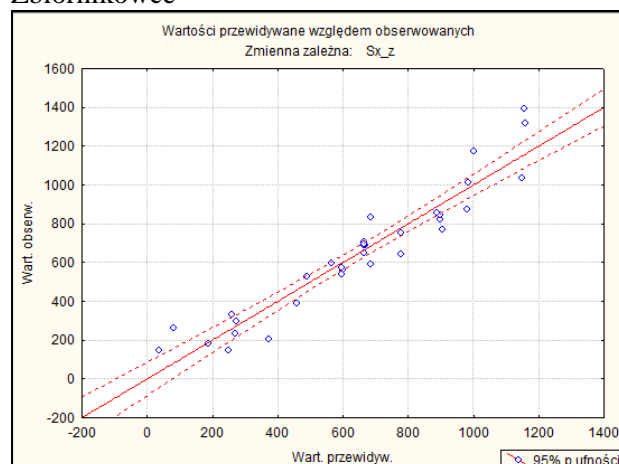
Masowce



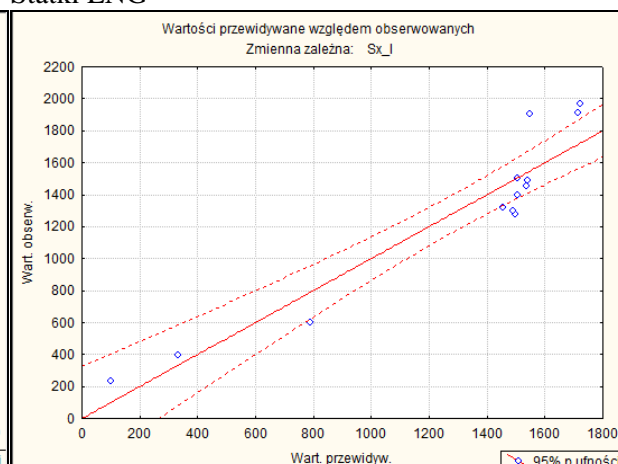
Kontenerowce



Zbiornikowce

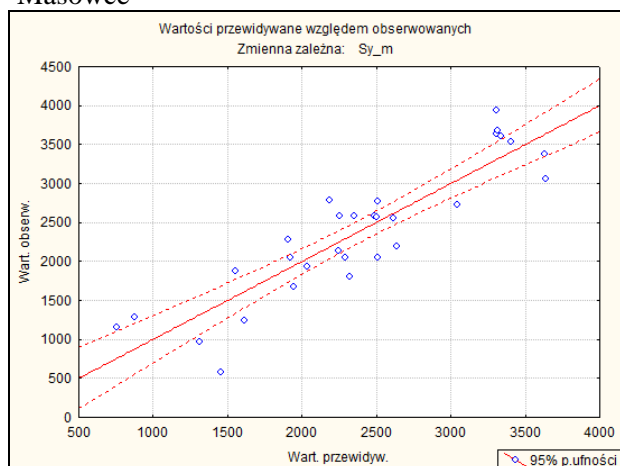


Statki LNG

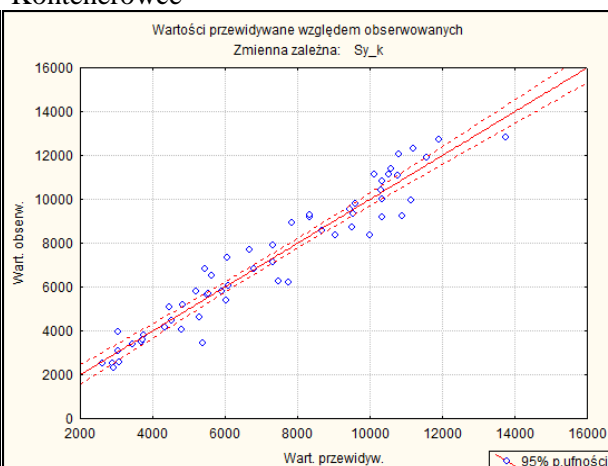
Rys. 6.19. Wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem obserwowanych dla aproksymacji nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x dla różnych typów statków

Źródło: opracowanie własne.

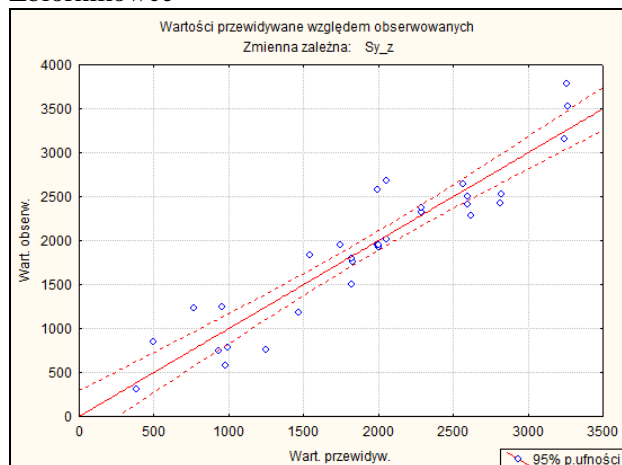
Masowce



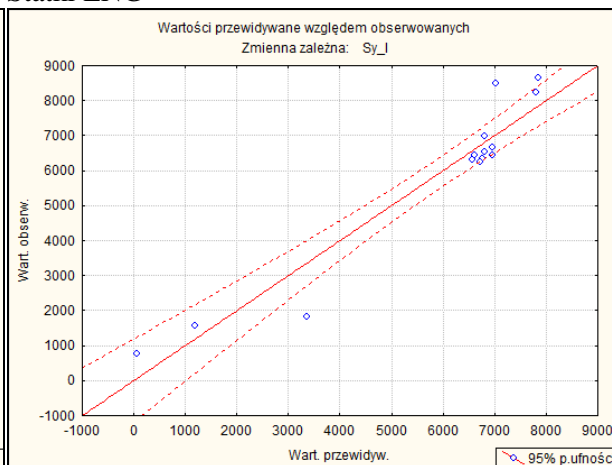
Kontenerowce



Zbiornikowce

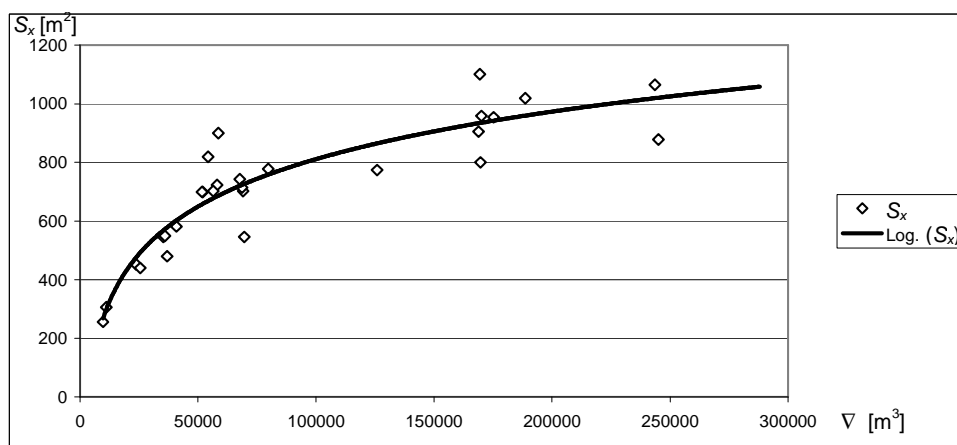


Statki LNG



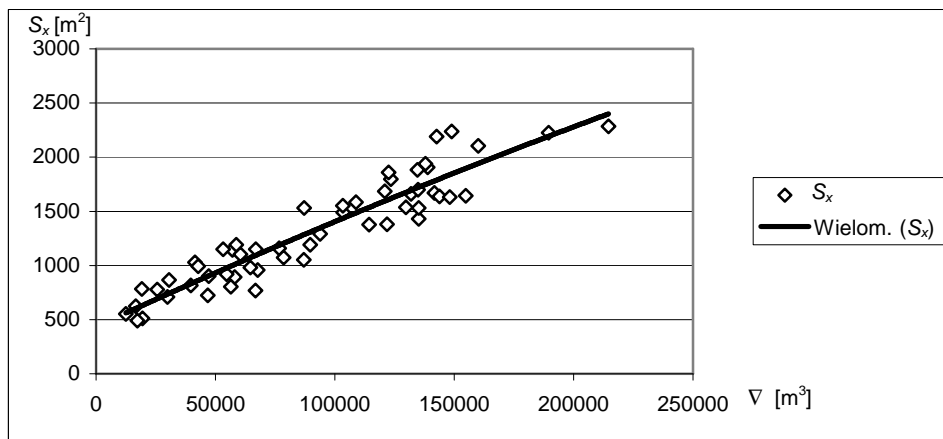
Rys. 6.20. Wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem obserwowanych dla aproksymacji nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y dla różnych typów statków

Źródło: opracowanie własne.



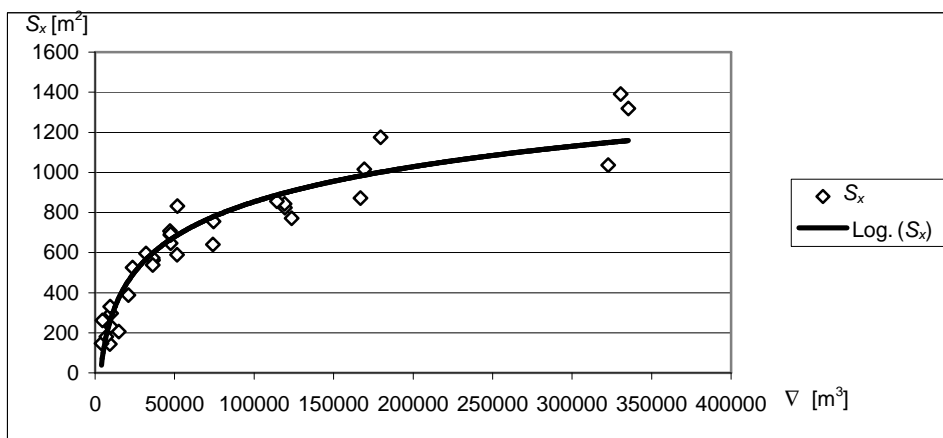
Rys. 6.21. Aproksymacja nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x w zależności od wyporności statku V dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



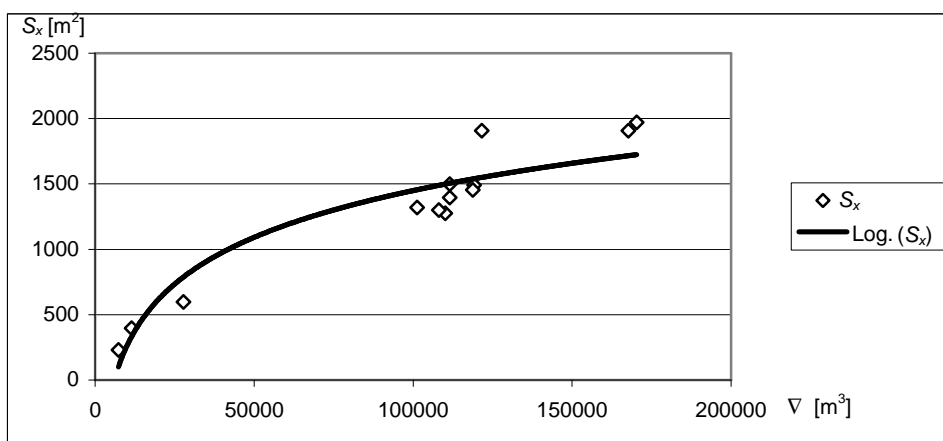
Rys. 6.22. Aproksymacja nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x w zależności od wyporności statku V dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne.



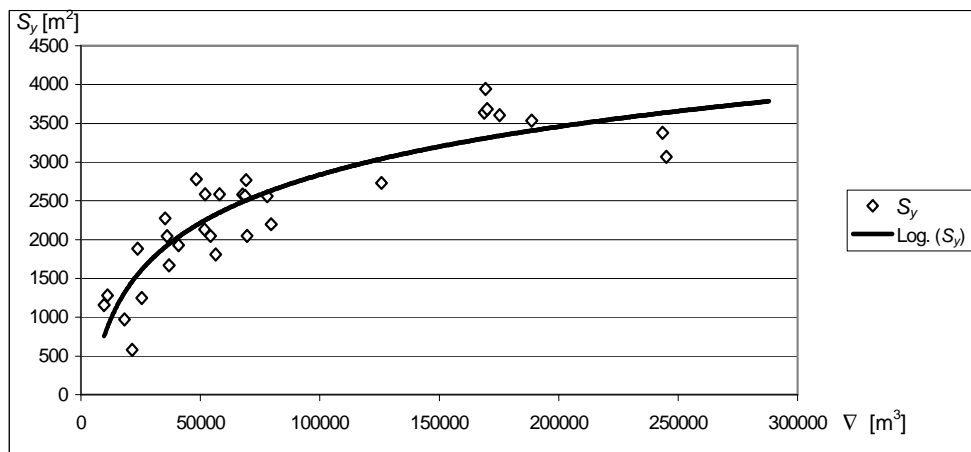
Rys. 6.23. Aproksymacja nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x w zależności od wyporności statku V dla zbiornikowców

Źródło: opracowanie własne.



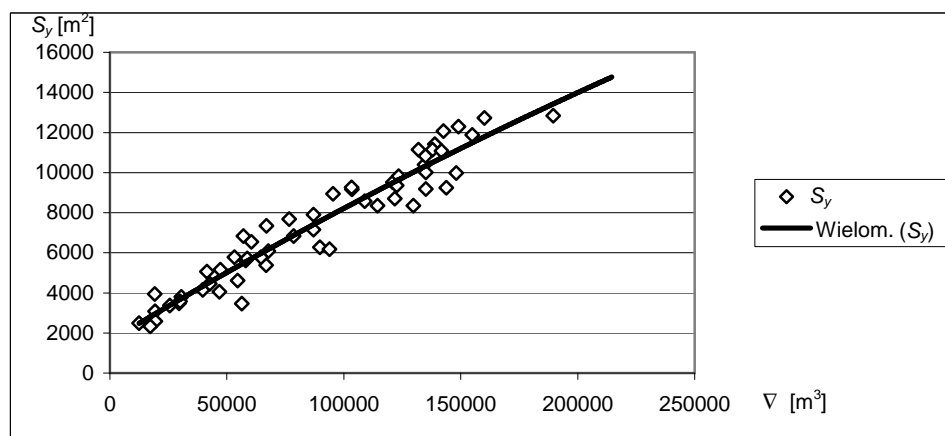
Rys. 6.24. Aproksymacja nadwodnej powierzchni statku od dziobu S_x w zależności od wyporności statku V dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne.



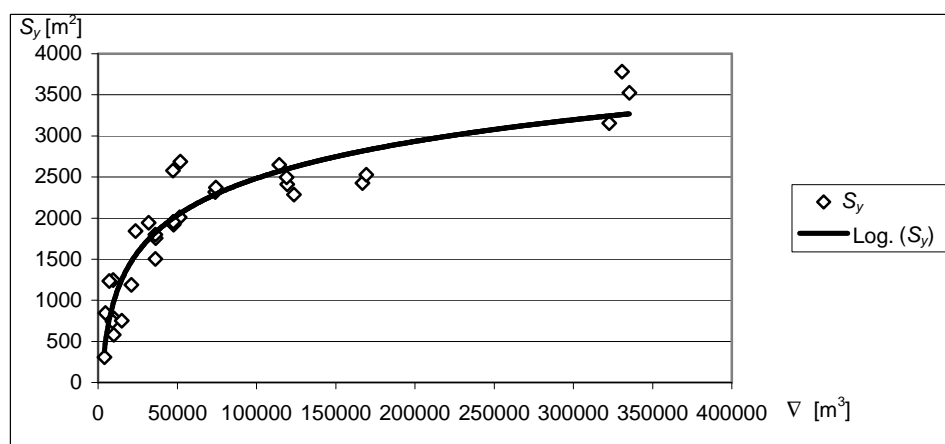
Rys. 6.25. Aproksymacja nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y w zależności od wyporności statku V dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



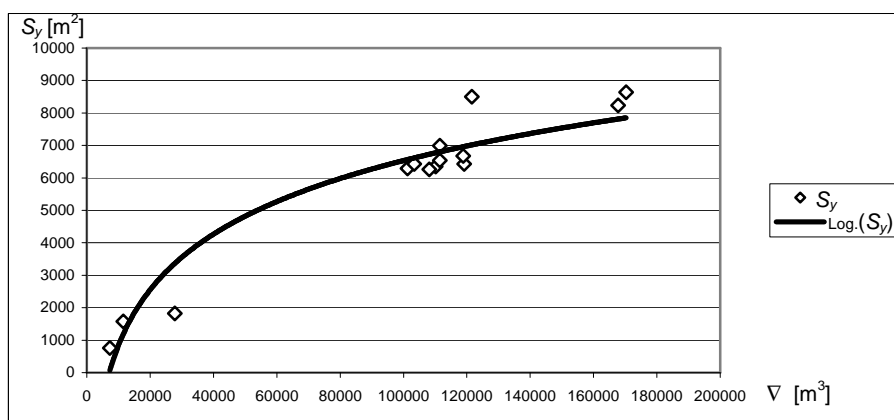
Rys. 6.26. Aproksymacja nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y w zależności od wyporności statku V dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.27. Aproksymacja nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y w zależności od wyporności statku V dla zbiornikowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.28. Aproksymacja nadwodnej, bocznej powierzchni statku S_y w zależności od wyporności statku V dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne.

6.4.2. Modele funkcji aproksymujących współczynniki oporu aerodynamicznego

6.4.2.1. Hipotezy robocze dla współczynników oporu aerodynamicznego C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am}

Współczynniki C_{Ax} , C_{Ay} i C_{Am} określane podczas badań modelowych [6, 84] nadwodnej części statku w tunelu aerodynamicznym lub obliczone z przybliżonych wzorów z prac [43, 87] dla danego typu statku w małym stopniu zależą od wielkości statku. Współczynniki C_{Ax} , C_{Ay} i C_{Am} dla danego typu statku aproksymowano wielomianem uzależnionym tylko od względnego kierunku wiatru β_{RA} . Otrzymane zależności dla różnych typów statków zawarte są odpowiednio w tabelach 6.14–6.16.

Tabela. 6.14. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji współczynnika C_{Ax} różnych typów statków

Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$C_{Ax}(\beta_{RA}) = 0,4770 + 0,01528 \cdot \beta_{RA} - 3,202 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,060 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3$	0,989
Kontenerowce	$C_{Ax}(\beta_{RA}) = 0,47676 + 0,00991 \cdot \beta_{RA} - 2,5026 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 9,2900 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3$	0,987
Zbiornikowce	$C_{Ax}(\beta_{RA}) = 0,4849 + 0,0150 \cdot \beta_{RA} - 3,139 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,0363 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3$	0,988
Statki LNG	$C_{Ax}(\beta_{RA}) = 1,2582 + 0,0068 \cdot \beta_{RA} - 4,1537 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,6750 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3$	0,995

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.15. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji współczynnika C_{Ay} różnych typów statków

Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$C_{Ay}(\beta_{RA}) = -0,01529 + 0,01529 \cdot \beta_{RA} - 8,710 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2$	0,981
Kontenerowce	$C_{Ay}(\beta_{RA}) = 0,01991 \cdot \beta_{RA} - 1,1108 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2$	0,981
Zbiornikowce	$C_{Ay}(\beta_{RA}) = 0,0151 \cdot \beta_{RA} - 8,674 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2$	0,979
Statki LNG	$C_{Ay}(\beta_{RA}) = -0,1490 \cdot \beta_{RA} + 0,0288 \cdot \beta_{RA} - 0,0002 \cdot \beta_{RA}^2$	0,965

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.16. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji współczynnika C_{Am} różnych typów statków

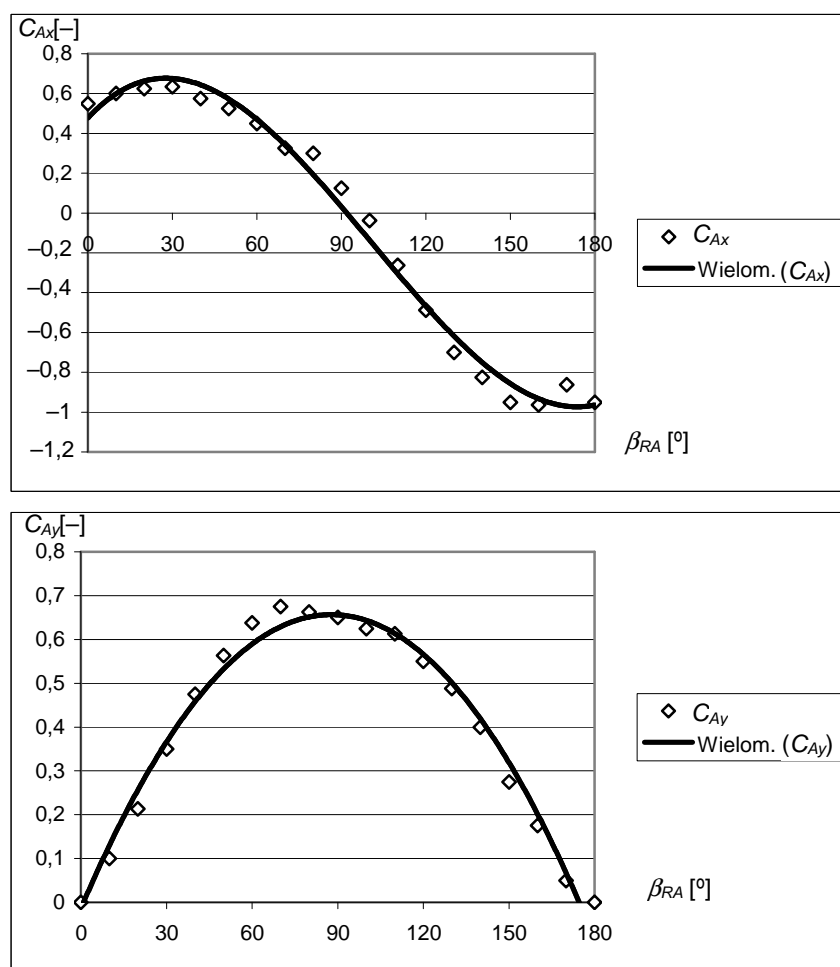
Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$C_{Am}(\beta_{RA}) = -0,0071 \cdot \beta_{RA} + 0,0001 \cdot \beta_{RA}^2 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 + 1 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4$	0,992
Kontenerowce	$C_{Am}(\beta_{RA}) = -0,0048 \cdot \beta_{RA} + 1,056 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - 5,181 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3$	0,980
Zbiornikowce	$C_{Am}(\beta_{RA}) = -0,0054 \cdot \beta_{RA} + 6,675 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2 - 2,057 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3$	0,949
Statki LNG	$C_{Am}(\beta_{RA}) = -0,0075 \cdot \beta_{RA} + 1,5069 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - 9,19 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 + 2,0 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4$	0,970

Źródło: opracowanie własne.

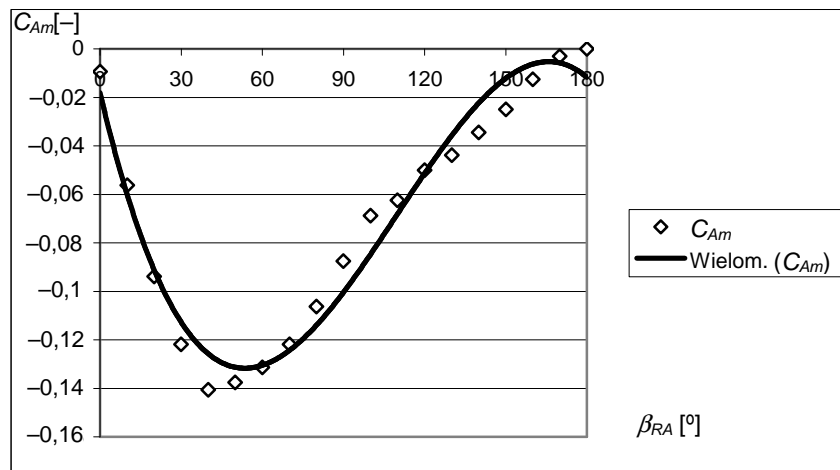
6.4.2.2. Weryfikacja merytoryczna dla współczynników oporu aerodynamicznego

 C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am}

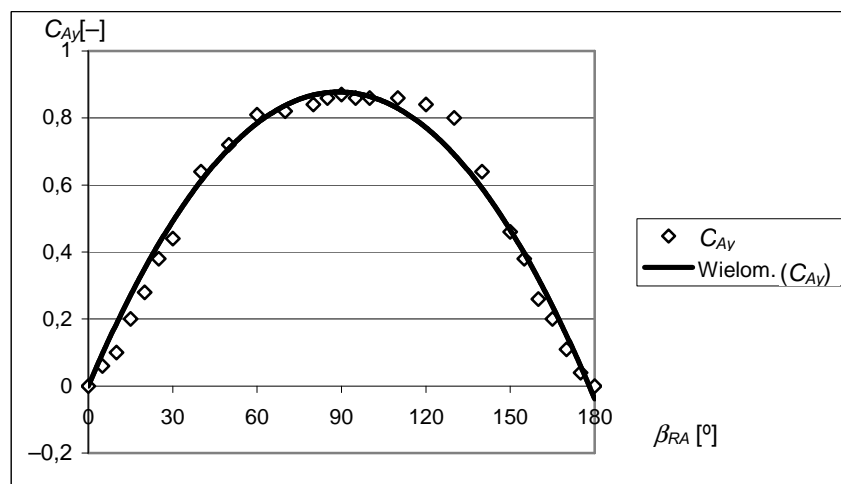
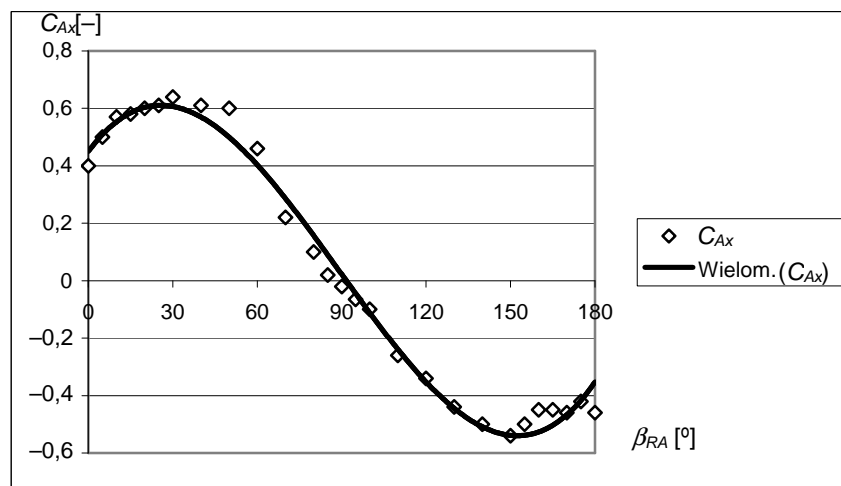
Dokładność aproksymacji w stosunku do pomiarów z tunelu aerodynamicznego pokazano na rysunkach 6.29–6.32.

Rys. 6.29. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla masowców

Źródło: opracowanie własne.

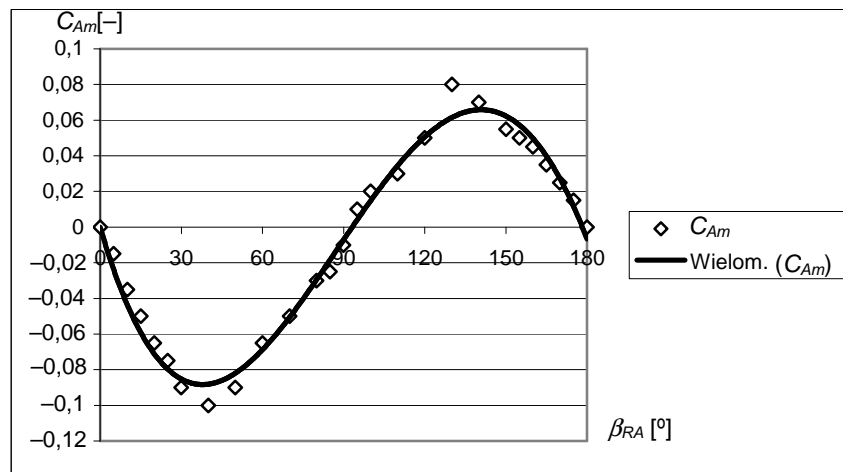


Rys. 6.29. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla masowców (cd.)

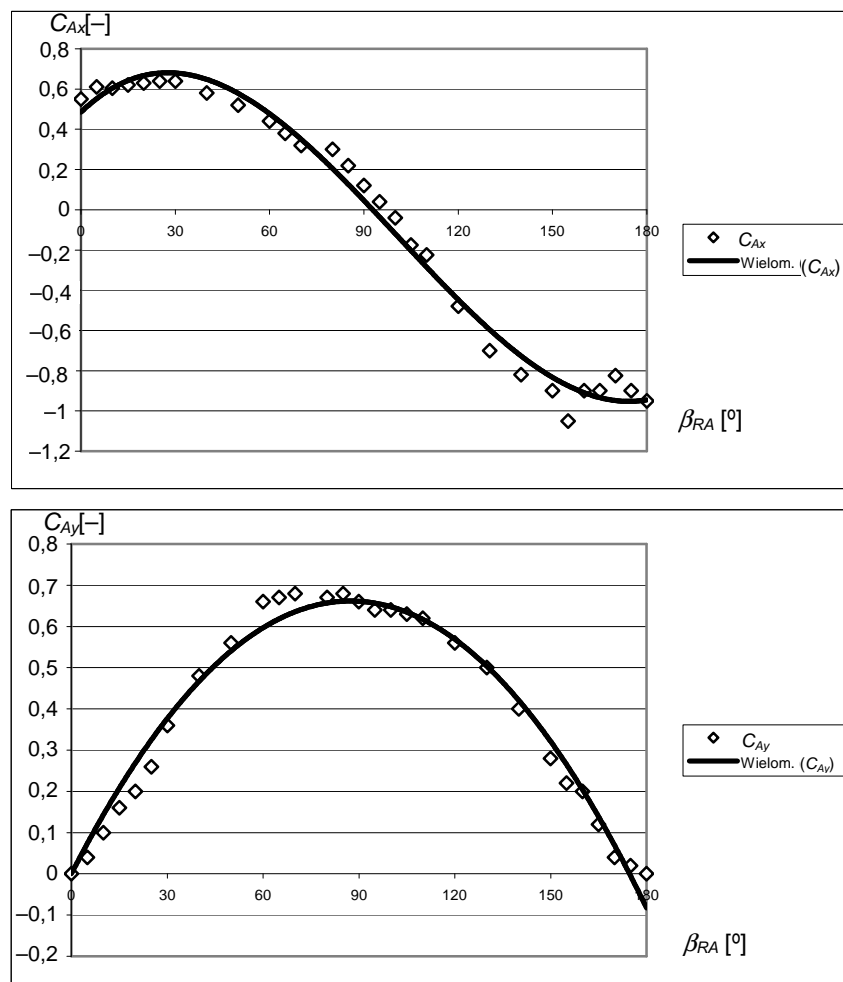


Rys. 6.30. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla kontenerowców

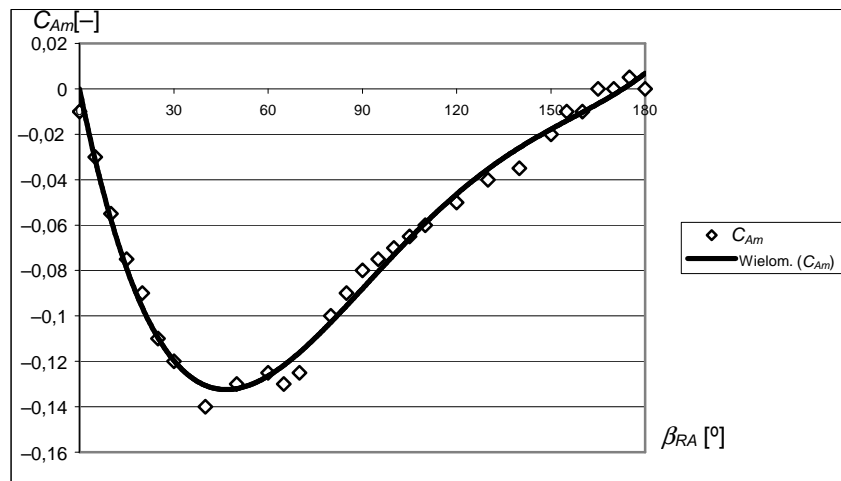
Źródło: opracowanie własne.



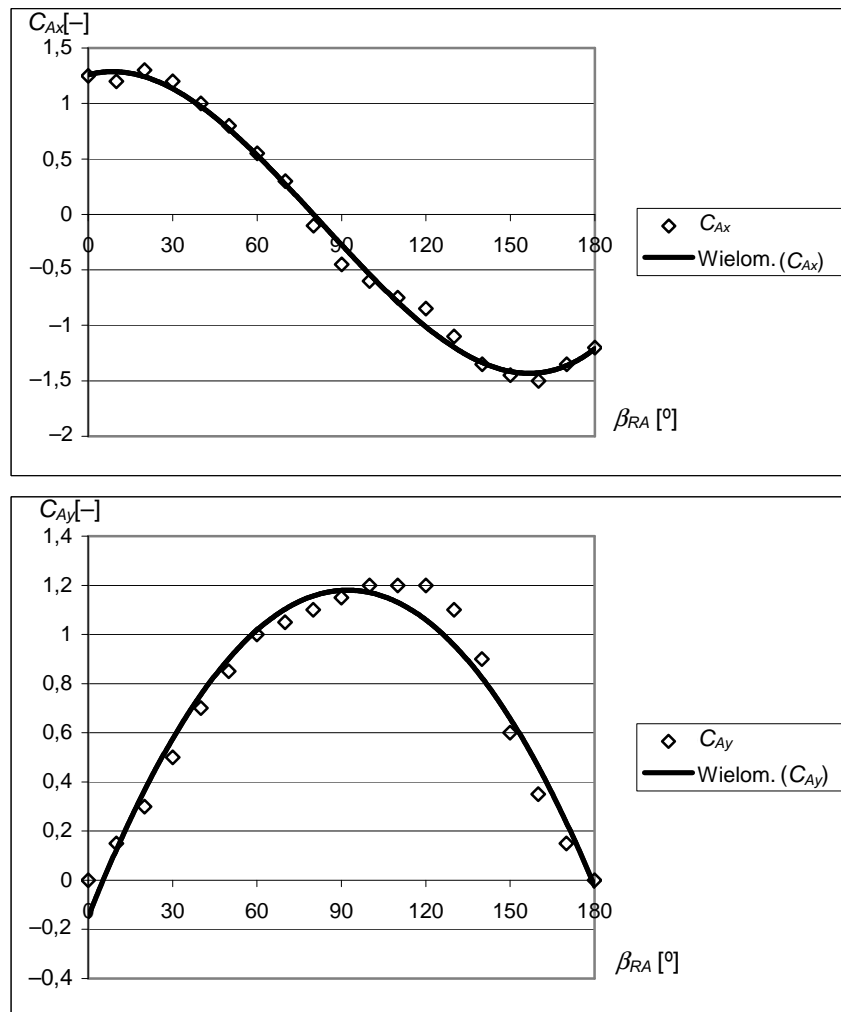
Rys. 6.30. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla kontenerowców (cd.)
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.31. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla zbiornikowców
 Źródło: opracowanie własne.

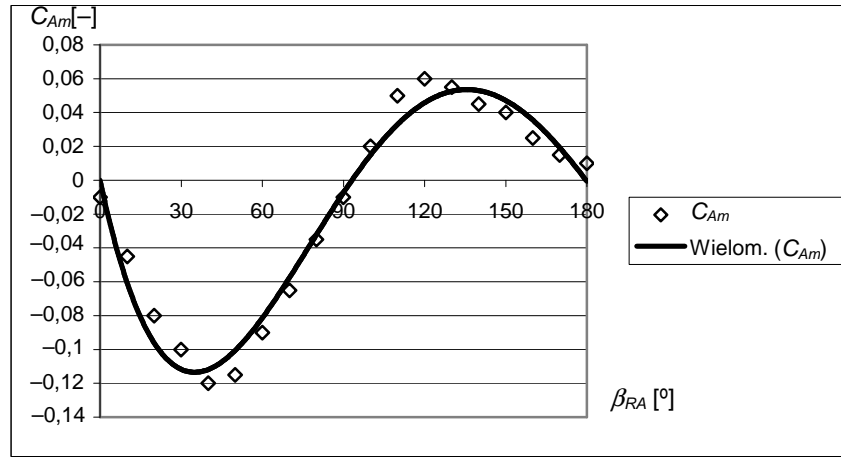


Rys. 6.31. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [6] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla zbiornikowców (cd.)



Rys. 6.32. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [84] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.32. Charakterystyki C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} z pomiarów w tunelu aerodynamicznym [84] i uzyskane z aproksymacji (tabele 6.14–6.16) dla statków LNG (cd.)

6.4.3. Weryfikacja merytoryczna dodatkowego oporu od wiatru

Po uwzględnieniu aproksymacji dla współczynników C_{Ax} , C_{Ay} , C_{Am} oraz powierzchni S_x , S_y równania (6.13) dla poszczególnych typów statków mają postać:

Masowce

$$\begin{aligned}
 R_{xA} &= -\frac{1}{2} \rho_A \cdot (233,71 \cdot \ln(V) - 1879,3) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,4770 + 0,01528 \cdot \beta_{RA} - 3,202 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + \\
 &\quad + 1,060 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3), \\
 R_{yA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (895,4 \cdot \ln(V) - 7472,4) \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,01529 + 0,01529 \cdot \beta_{RA} - 8,710 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2), \\
 M_{zA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (895,4 \cdot \ln(V) - 7472,4) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,0071 \cdot \beta_{RA} + 0,0001 \cdot \beta_{RA}^2 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 \\
 &\quad + 1 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4),
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

Kontenerowce

$$\begin{aligned}
 R_{xA} &= -\frac{1}{2} \rho_A \cdot (467,7 + 0,0093 \cdot V) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,47676 + 0,00991 \cdot \beta_{RA} - 2,5026 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + \\
 &\quad + 9,2900 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3), \\
 R_{yA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (1848,1 + 0,0628 \cdot V) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,01991 \cdot \beta_{RA} - 1,1108 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2), \\
 M_{zA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (1848,1 + 0,0628 \cdot V) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0048 \cdot \beta_{RA} + 1,056 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - 5,181 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3),
 \end{aligned} \tag{6.15}$$

Zbiornikowce

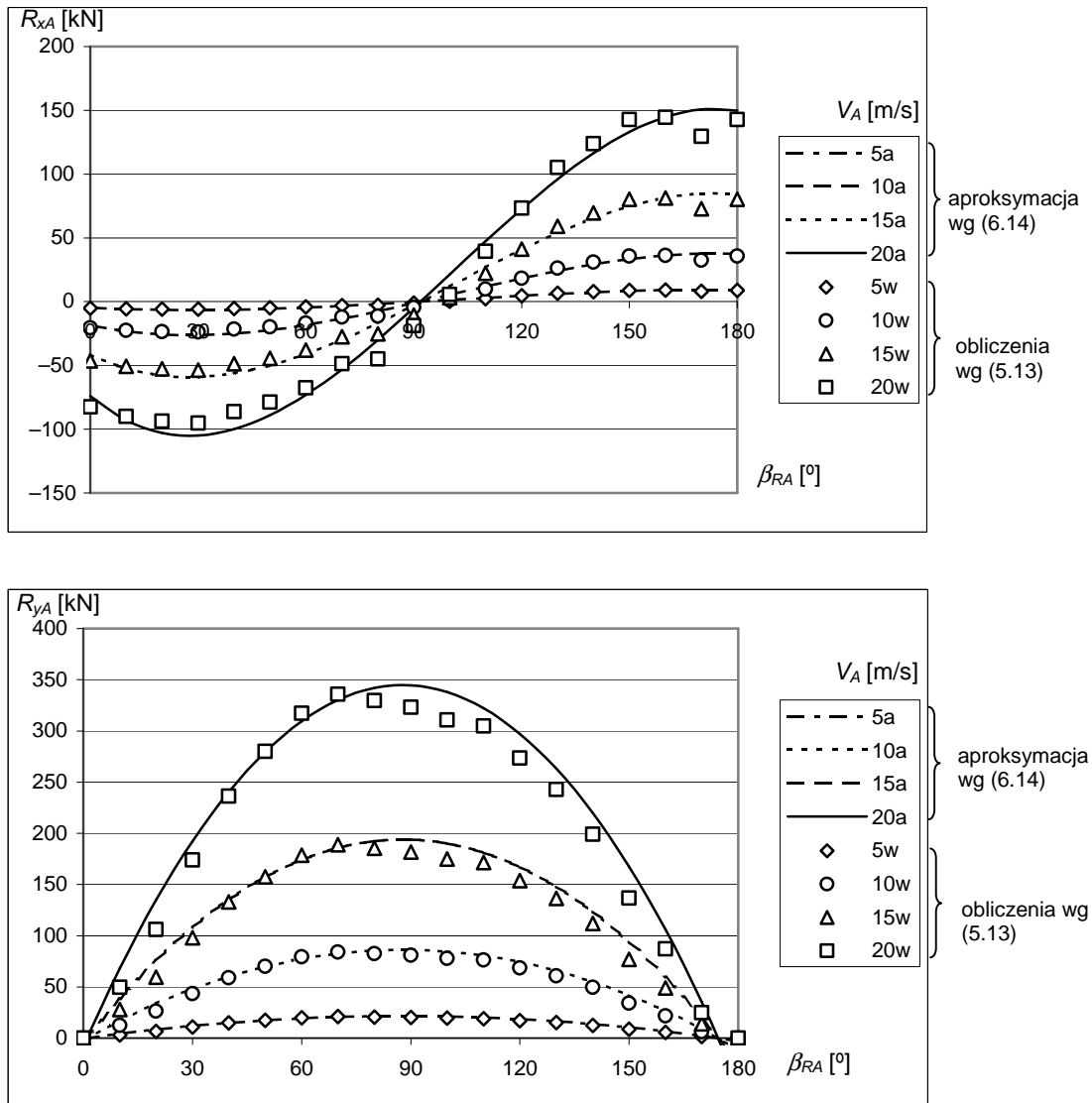
$$\begin{aligned}
 R_{xA} &= -\frac{1}{2} \rho_A \cdot (252,14 \cdot \ln(V) - 2049,4) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,4849 + 0,0150 \cdot \beta_{RA} - 3,139 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + \\
 &\quad + 1,0363 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3), \\
 R_{yA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (648,93 \cdot \ln(V) - 4987,2) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,0151 \cdot \beta_{RA} - 8,674 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2), \\
 M_{zA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (648,93 \cdot \ln(V) - 4987,2) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0054 \cdot \beta_{RA} + 6,675 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2 - \\
 &\quad - 2,057 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3),
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

Statki LNG

$$\begin{aligned}
 R_{xA} &= -\frac{1}{2} \rho_A \cdot (515,89 \cdot \ln(\nabla) - 4490,3) \cdot V_{RA}^2 \cdot (1,2582 + 0,0068 \cdot \beta_{RA} - 4,1537 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + \\
 &\quad + 1,6750 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3), \\
 R_{yA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (2473,8 \cdot \ln(\nabla) - 21947,0) \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,1490 \cdot \beta_{RA} + 0,0288 \cdot \beta_{RA} - 0,0002 \cdot \beta_{RA}^2), \\
 M_{zA} &= \frac{1}{2} \rho_A \cdot (2473,8 \cdot \ln(\nabla) - 21947,0) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0075 \cdot \beta_{RA} + 1,5069 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - \\
 &\quad - 9,19 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 + 2,0 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4),
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

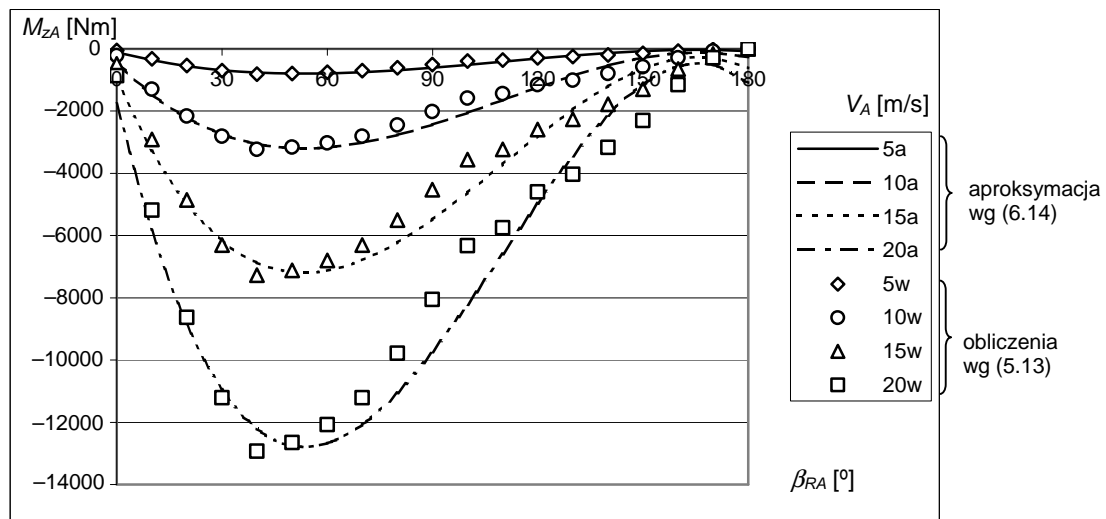
gdzie ∇ – wyporność statku.

Obliczoną przykładową wartość składowych dodatkowego oporu od wiatru dla statków z bazy B przedstawiono na rysunkach 6.33 i 6.34.

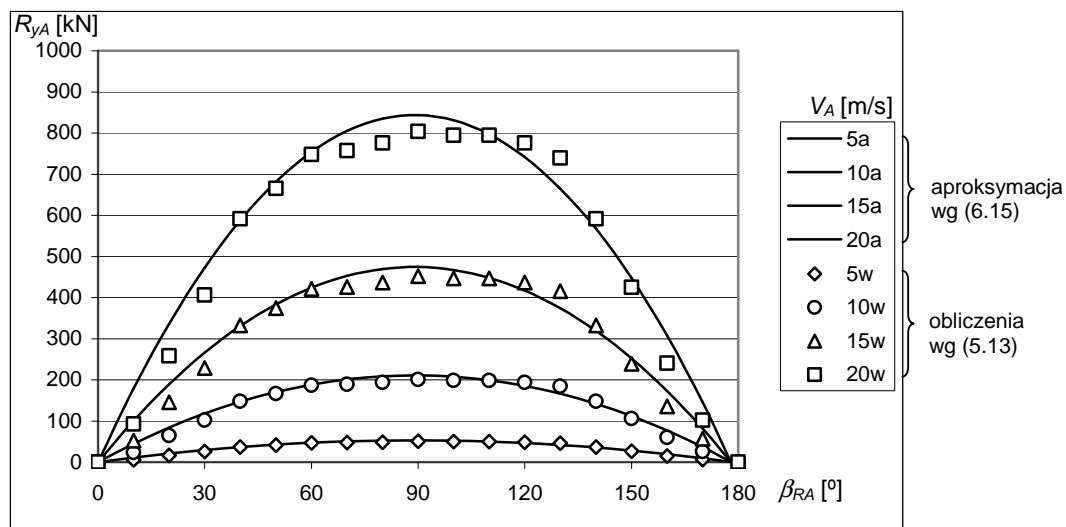
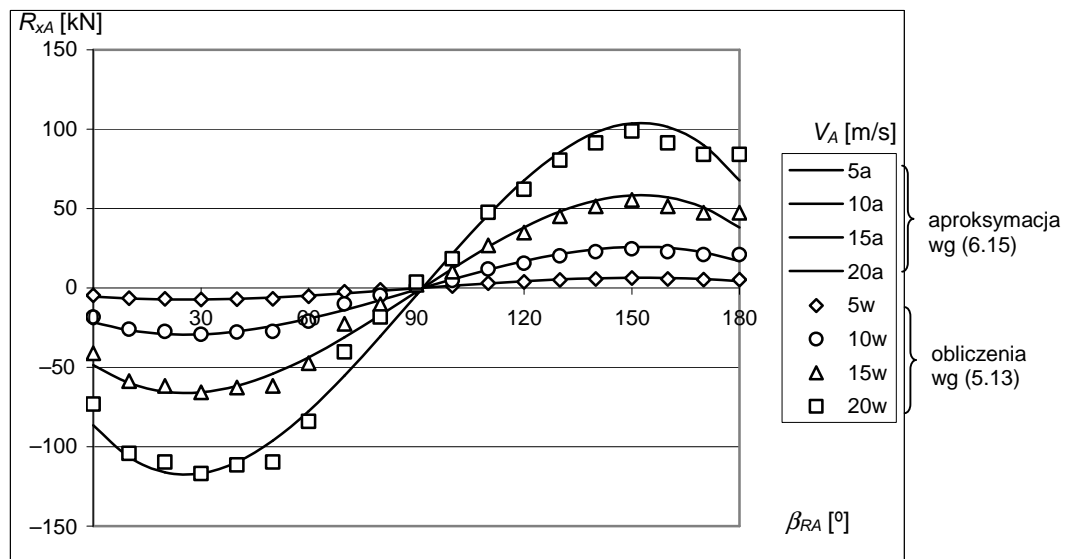


Rys. 6.33. Siły i moment od wiatru dla różnych prędkości wiatru V_A – masowiec M2

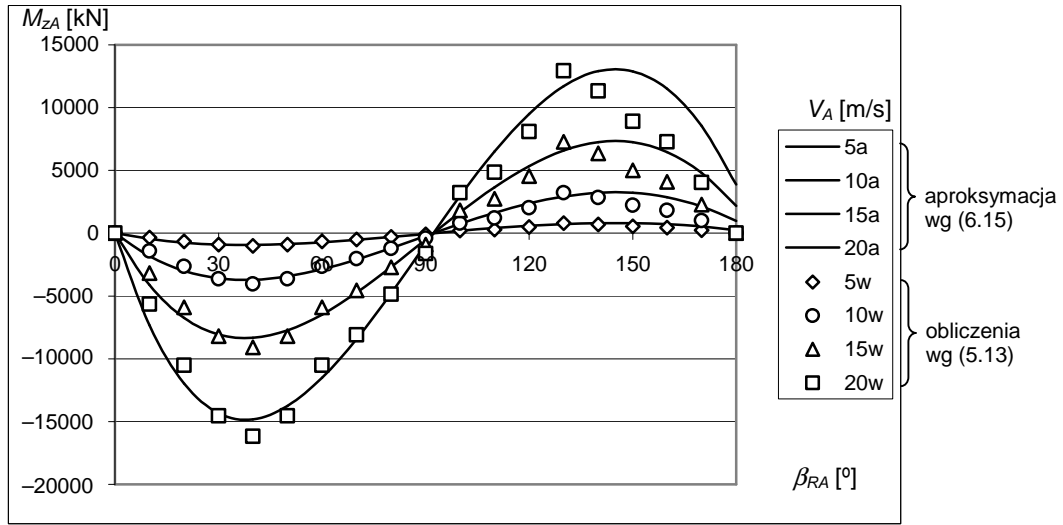
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.33. Siły i moment od wiatru dla różnych prędkości wiatru V_A – masowiec M2 (cd.)



Rys. 6.34. Siły i moment od wiatru dla różnych prędkości wiatru V_A – kontenerowiec K2
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.34. Siły i moment od wiatru dla różnych prędkości wiatru V_A – kontenerowiec K2 (cd.)

Procentowy udział dodatkowego oporu od wiatru R_{xA} w całkowitym oporze statku w zależności od wielkości statku i prędkości wiatru na fali przeciwej może wynosić około 30% [18]. Biorąc to pod uwagę można stwierdzić, że uzyskana dokładność aproksymacji jest na wystarczającym poziomie dla określania sił oddziaływania wiatru na statek na etapie projektowania wstępnego.

6.5. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od falowania

Składowe dodatkowego oporu od falowania dane są równaniami (5.18). W literaturze dotyczącej aproksymacji dodatkowego oporu od fali [12, 14, 15] przedstawione są aproksymacje:

- współczynników falowej siły dryfu C_{wx} , C_{wy} , C_{wm} , które dla danego statku zależą od częstotliwości fali regularnej ω , kierunku fali względem statku β_W i prędkości statku V ;
- siły dodatkowego oporu R_{xW} na fali nieregularnej.

Ponieważ celem badań jest określenie średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku na linii żeglugowej, na której występują nieregularne fale o różnych wysokościach i okresach (rozdz. 4), to zdecydowano się na aproksymacje sił (R_{xW} , R_{yW}) i momentu (M_{zW}). Po przeprowadzeniu wstępnych analiz, stosując różne metody aproksymacyjne, najlepsze wyniki uzyskano dla sztucznych sieci neuronowych.

6.5.1. Hipotezy robocze dla składowych oporu od fali R_{xW} , R_{yW} , M_{zW}

Ogólna postać poszukiwanej funkcji aproksymującej jest następująca:

$$R_{xW}, R_{yW}, M_{zW} = f(L, B, T, C_B, C_{WP}, F_W, V, \beta_W, H_S), \quad (6.18)$$

$$\text{gdzie } F_W = L \cdot B \cdot C_{WP}. \quad (6.19)$$

Jako funkcje aktywacji w warstwie ukrytej wykorzystano funkcję sigmoidalną bipolarną w postaci:

$$y(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1, \quad (6.20)$$

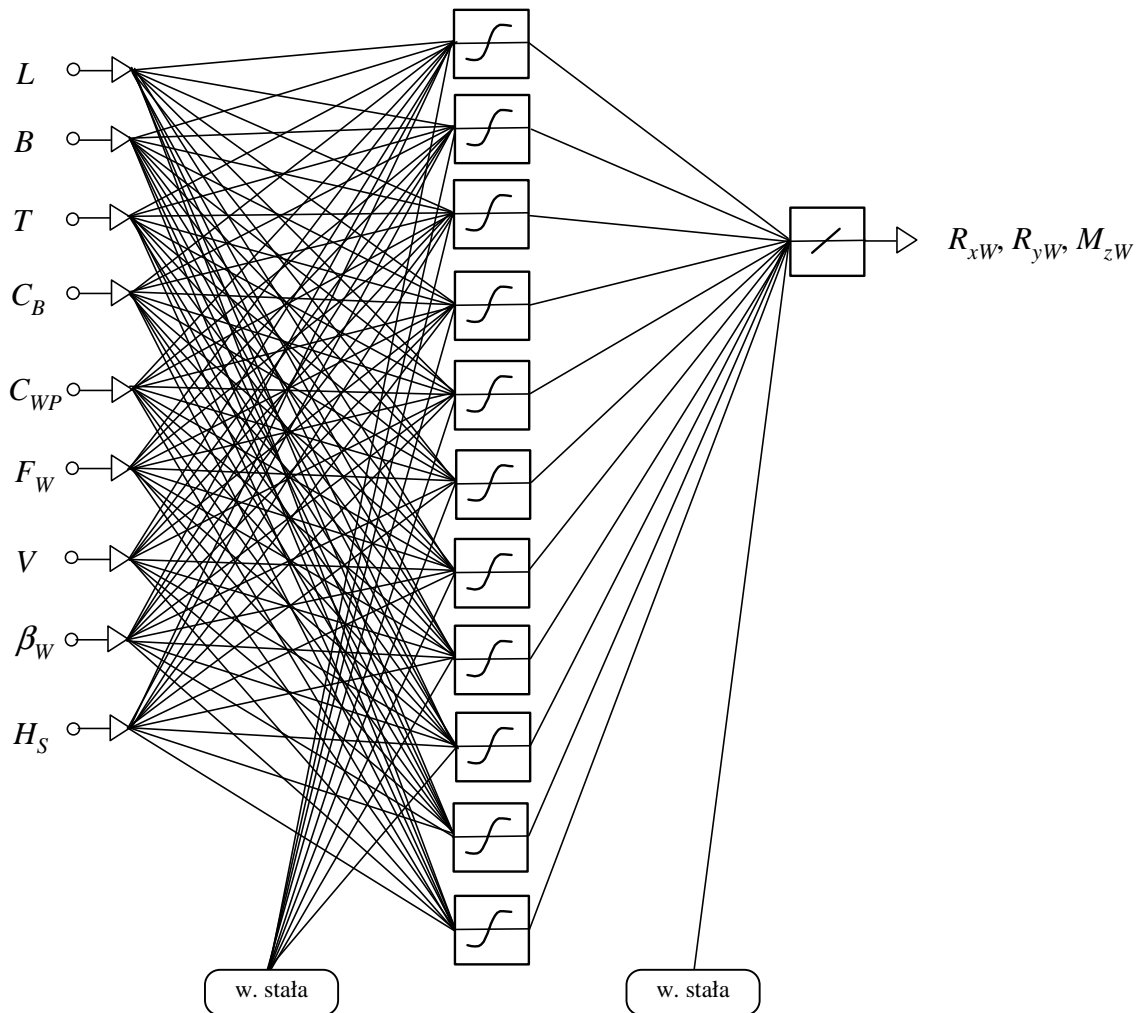
a w warstwie wyjściowej – funkcję liniową.

Strukturę zaprojektowanej sieci przedstawiono na rysunku 6.35.

Opracowana funkcja aproksymacyjna dla R_{xW} , R_{yW} i M_{zW} ma następującą postać:

$$f(x_1 \cdots x_k) = \sum_{i=1}^{11} c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) + D, \text{ dla } k = 9, \quad (6.21)$$

gdzie $x_k = [L, B, T, C_B, C_{WP}, F_W, V, \beta_W, H_S]$ są kolejnymi argumentami sieci neuronowej (dane wejściowe), a wartości współczynników dla każdej sieci (siły R_{xW} , R_{yW} i moment M_{zW}) zamieszczono w tabelach 6.17–6.19 dla wszystkich typów statków.



Rys. 6.35. Struktura zaprojektowanej sieci neuronowej

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.17. Współczynniki dla sieci, według wzoru (6.21), aproksymującej siłę R_{xw}

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	b_i	c_i
1	13,534	12,426	-12,001	0,044	13,977	-11,497	0,456	-1,266	3,786	2,267	-0,081
2	9,896	-27,149	14,009	1,090	-23,653	-8,558	0,792	18,594	0,644	-2,548	-0,073
3	0,080	-0,121	0,342	-0,048	0,232	-0,287	-0,072	-2,139	-0,119	1,511	22,955
4	-0,025	-0,177	0,318	-0,047	0,161	-0,108	-0,067	-2,076	-0,129	1,500	-23,596
5	-0,2545	-0,205	0,318	0,029	-0,078	0,541	0,420	0,519	0,629	-1,694	1,352
6	-14,606	19,862	2,157	12,499	12,842	3,630	-1,282	22,649	2,457	-10,884	0,047
7	2,900	11,198	-1,628	-1,234	3,837	-37,599	0,579	0,8723	-1,724	-11,508	-0,111
8	-2,213	3,708	22,562	8,122	4,880	-6,796	-0,346	2,655	-1,674	3,436	-0,078
9	37,028	28,987	-1,671	-0,990	20,703	-69,696	0,291	9,899	1,915	-17,721	0,047
10	7,553	0,171	10,2378	6,334	7,985	-12,636	0,063	16,727	-0,702	-23,309	-0,434
11	1,235	1,095	-0,144	0,035	0,607	-1,968	-0,118	0,524	0,380	-1,046	-0,631
D	0,473										

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.18. Współczynniki dla sieci, według wzoru (6.21), aproksymującej siłę R_{yw}

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	b_i	c_i
1	-0,680	2,526	-0,749	3,949	3,194	0,327	-0,139	2,309	0,876	5,937	0,338
2	-0,061	-0,415	0,360	-0,328	0,032	-0,011	-0,077	0,995	1,136	1,665	0,570
3	0,244	1,379	-0,168	0,018	0,295	-1,385	-0,057	1,257	-0,266	0,518	1,514
4	1,022	0,817	0,267	-0,212	0,947	-2,158	-0,125	2,227	-0,330	-0,863	2,686
5	5,371	0,172	-5,585	1,026	-1,644	1,617	0,166	-4,194	-0,394	-2,403	0,492
6	-0,040	-0,294	0,424	0,315	-0,116	0,419	0,107	-1,924	-1,124	-0,386	1,539
7	-2,578	-0,641	2,635	-0,433	-2,247	3,411	0,098	-2,642	0,543	-0,429	-0,552
8	-0,836	-0,260	-0,561	0,168	-0,926	1,264	0,126	-2,256	0,195	0,429	2,335
9	-3,137	-7,430	8,556	-4,894	-0,061	6,379	0,141	-3,233	0,368	-0,788	0,649
10	-0,320	-0,871	0,069	0,054	-0,279	0,835	0,000	0,564	-0,849	1,775	-13,749
11	-0,326	-0,910	0,060	0,065	-0,293	0,854	-0,001	0,588	-0,823	1,8012	14,366
D	-0,211										

Źródło: opracowanie własne.

Tabela. 6.19. Współczynniki dla sieci, według wzoru (6.21), aproksymującej siłę M_{zw}

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	b_i	c_i
1	-1,098	-7,165	-1,272	0,900	2,551	-2,686	0,001	-0,001	-0,003	-2,524	-16,575
2	8,945	7,201	-7,538	0,416	3,169	-7,791	1,491	-10,0501	1,626	-9,638	0,025
3	0,502	12,843	0,166	-2,986	-6,950	3,415	-0,541	7,047	-0,544	1,613	-2,319
4	-3,409	-1,628	0,736	0,029	-1,139	5,550	0,422	0,454	0,523	-1,110	-2,883
5	-8,945	-3,183	18,661	-1,288	-17,480	-14,859	-1,335	3,131	2,625	-13,844	0,033
6	0,921	4,052	3,773	-0,436	11,382	12,334	2,354	-4,990	1,686	12,289	-0,018
7	-1,092	-3,942	4,083	1,353	-0,256	-10,260	0,213	-0,112	-0,487	-5,278	11,938
8	11,416	7,773	-0,499	-0,063	4,814	-24,268	-0,347	-7,256	0,005	-2,235	-0,357
9	-0,181	15,088	6,183	-8,210	-6,967	5,852	-0,538	-11,836	-0,488	1,647	-2,321
10	-0,063	-1,350	1,494	0,029	-0,043	0,648	-0,379	0,084	0,662	-2,086	0,772
11	2,419	2,043	1,583	0,065	1,749	-7,763	0,950	-11,317	0,758	6,685	0,336
D	-1,196										

Źródło: opracowanie własne.

Obliczenie wartości sił R_{xW} , R_{yW} i momentu M_{zW} oddziaływania falowania na pływający statek, z wykorzystaniem opracowanej sztucznej sieci neuronowej, jej struktury oraz wyznaczonych w procesie uczenia wartości współczynników (wag), przebiega następująco:

1. przeskalowanie (normalizacja) danych wejściowych $x_k = [L, B, T, C_B, C_{WP}, F_W, V, \beta_W, H_S]$ zgodnie z zależnością (3.4), dla wartości x_{max} , x_{min} z tabeli 6.20;
2. obliczenie wartości z sieci według funkcji (6.21) oraz parametrów z tabel 6.17–6.19;
3. przeskalowanie uzyskanych wartości z sieci zgodnie z zależnością (3.5), gdzie y_{max} oraz y_{min} to wartości liczbowe ze zbioru uczącego, i obliczenie ostatecznych sił i momentu:

$$\begin{aligned} R_{xW} &= \frac{(f(x_k)+1)(2183,63 - (-529,54))}{2} + (-529,54), \\ R_{yW} &= \frac{(f(x_k)+1)(1,57 - (-3745,06))}{2} + (-3745,06), \\ M_{zW} &= \frac{(f(x_k)+1)(29875,63 - (-384824,76))}{2} + (-384824,76). \end{aligned} \quad (6.22)$$

Tabela 6.20. Zakres badanych parametrów statków transportowych

Wartość	Parametr								
	L [m]	B [m]	T [m]	C_B [–]	C_{WP} [–]	F_W [m ²]	V [m/s]	β_W [°]	H_S [m]
Max.	240	32,24	12,00	0,820	0,872	6738,8	12	150	9
Min.	138	22,30	8,25	0,641	0,674	2528,2	0	0	1

Źródło: opracowanie własne.

6.5.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla składowych oporu od fali

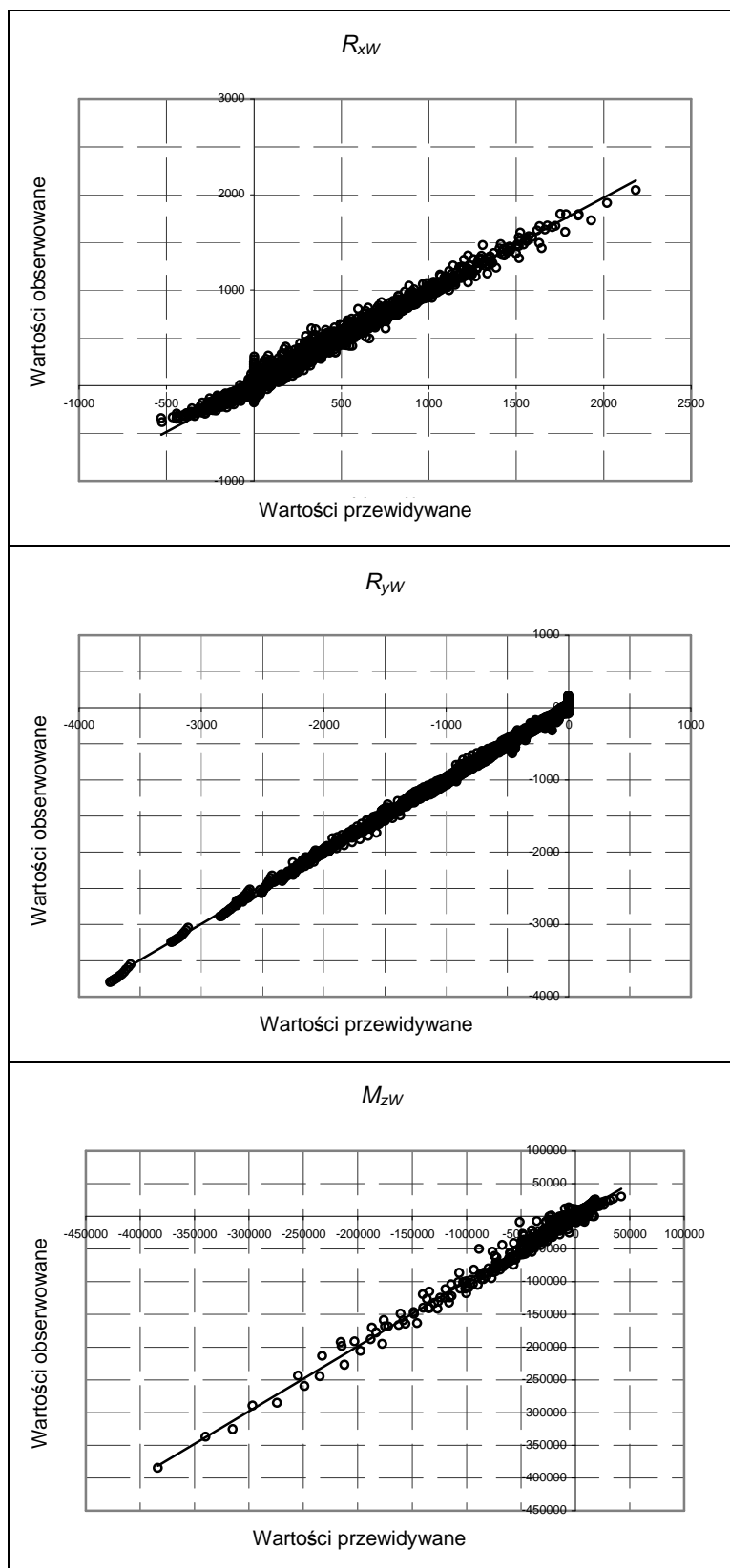
R_{xW} , R_{yW} , M_{zW}

W tabeli 6.21 przedstawiono strukturę oraz wybrane parametry statystyczne wykorzystanych sieci neuronowych, na rysunku 6.36 przedstawiono rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczanej sztucznej sieci neuronowej, natomiast na rysunkach 6.37 i 6.38 zamieszczono porównanie uzyskanych aproksymacji na podstawie równań (6.21) z wartościami obliczonymi przy wykorzystaniu programu WARES [20], a dla siły R_{xW} również porównanie z aproksymacją przedstawioną w publikacji [12] dla przykładowego masowca i kontenerowca.

Tabela 6.21. Struktura i wybrane parametry statystyczne wykorzystanych sieci neuronowych

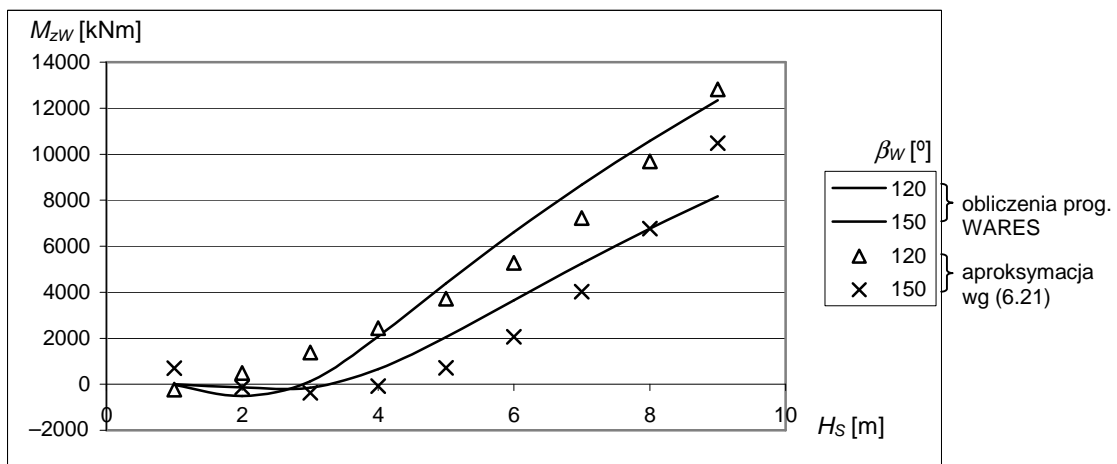
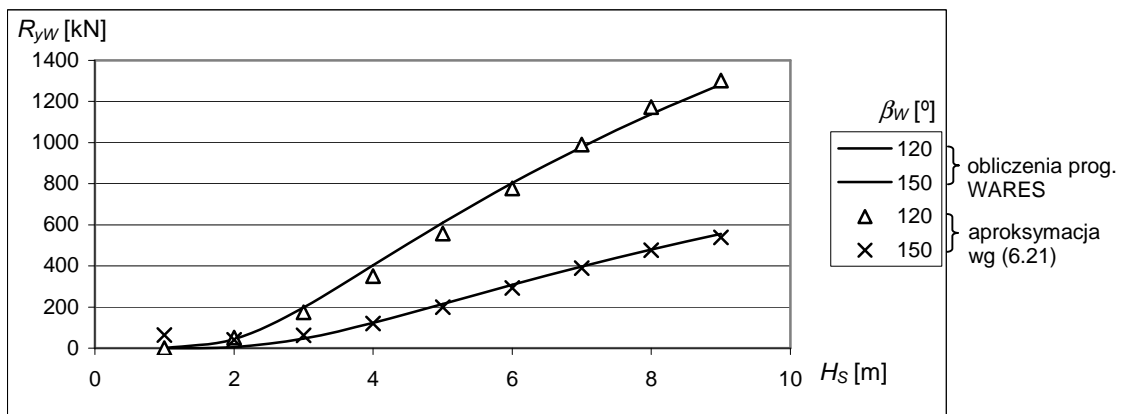
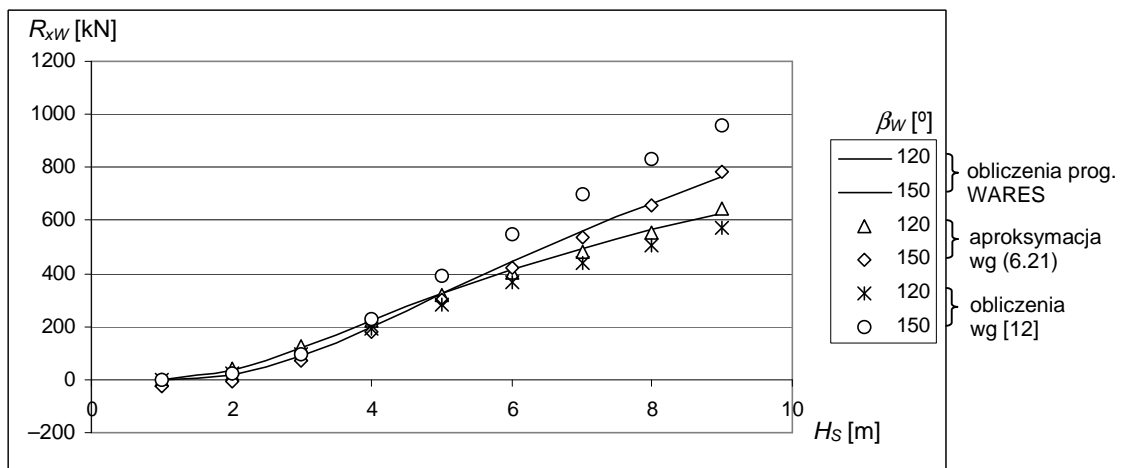
Parametr	Struktura sieci neuronowej	Współczynnik korelacji R^2	Średni błąd kwadratowy
R_{xW}	$9 \times 11 \times 1$	0,991	0,0010
R_{yW}	$9 \times 11 \times 1$	0,998	0,0003
M_{zW}	$9 \times 11 \times 1$	0,990	0,0005

Źródło: opracowanie własne.



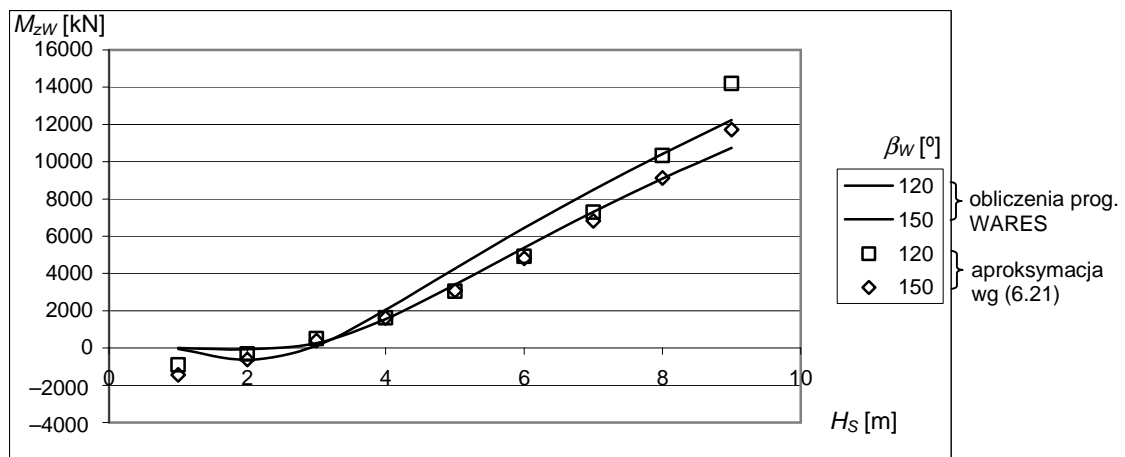
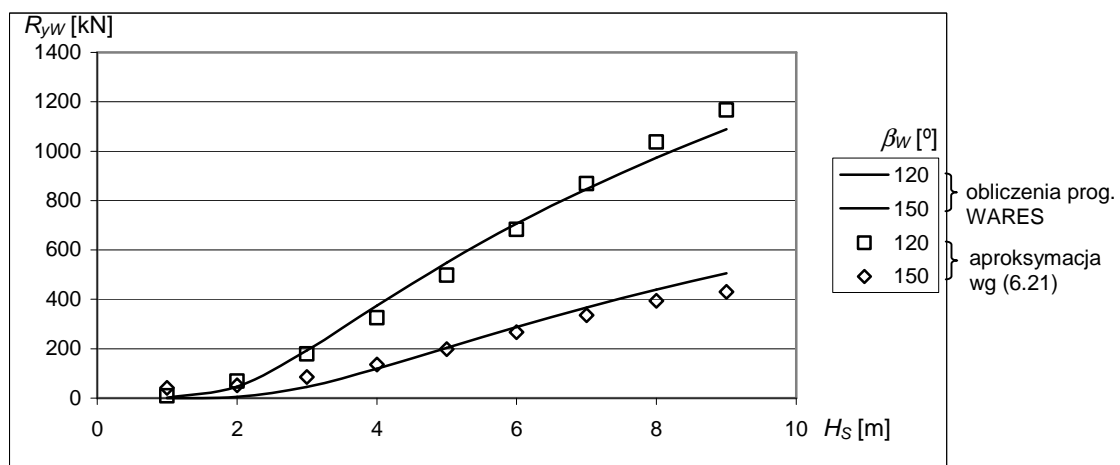
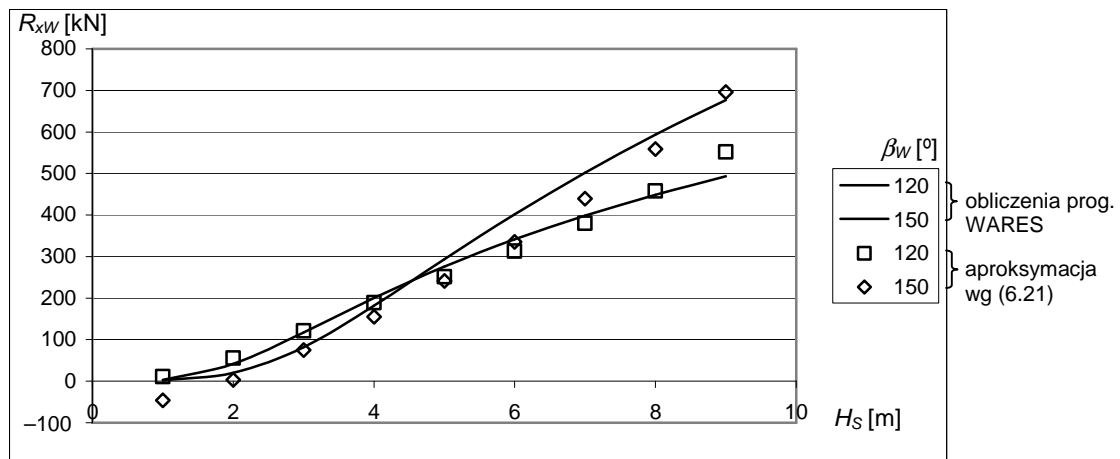
Rys. 6.36. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczanej sztucznej sieci neuronowej dla sił i momentu od falowania

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.37. Siły i moment od falowania dla różnych wysokości H_s i kierunku β_W fali względem statku – masowiec M1 ($V = 6$ m/s)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.38. Siły i moment od falowania dla różnych wysokości H_s i kierunku β_w fali względem statku – kontenerowiec K1 ($V = 8$ m/s)
 Źródło: opracowanie własne.

6.6. Modele funkcji aproksymującej dodatkowy opór od steru płetwowego

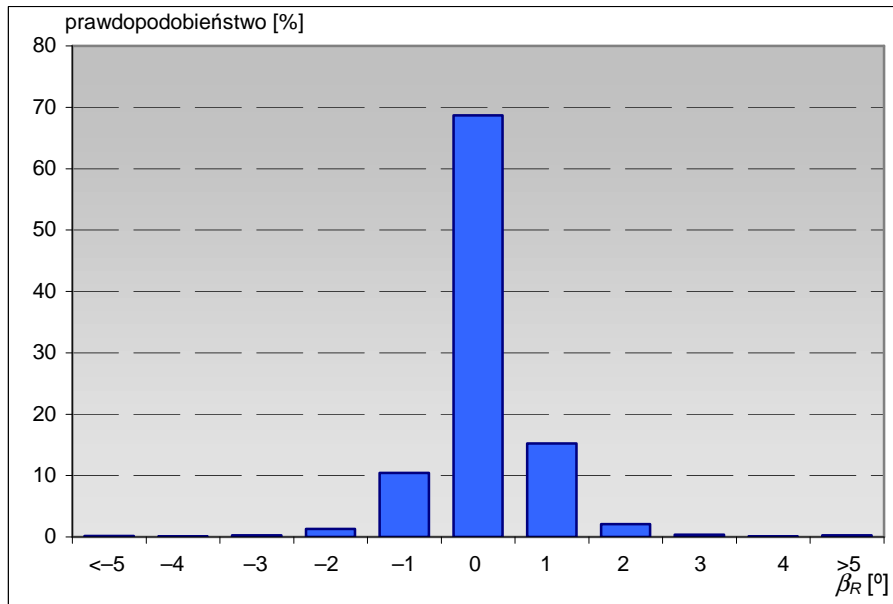
Składowe dodatkowego oporu od steru płetwowego przedstawiono w rozdziale 5.6, wykorzystując znany i sprawdzony algorytm [41].

W celu opracowania prostego wzoru aproksymacyjnego przyjęto następujące założenia:

– z przeprowadzonych obliczeń wielkości kąta dryfu β_R w rejonie steru [97] i wykonanego rozkładu tego kąta podczas ruchu statku na linii żeglugowej (przykład uzyskanych wyników – rys. 6.39) przyjęto, że efektywny kąt natarcia (rys. 5.10) będzie:

$$\alpha_R \equiv \delta_R, \quad (6.23)$$

powierzchnia steru A_R oraz wydłużenie steru λ zostaną uzależnione od podstawowych wymiarów statku.



Rys. 6.39. Rozkład kąta dryfu dla kontenerowca K1 na trasie Europa Zach. – USA Wschodnie (średni statystyczny kąt dryfu w rejonie steru na LB $\beta_R = 1,13^\circ$, a na PB $\beta_R = 1,10^\circ$)

Źródło: opracowanie własne.

Analizując postać równań opisujących składowe dodatkowego oporu od steru płetwowego (rozdz. 5.6) poszukiwano modeli aproksymujących dla wielkości z równania (5.22):

- powierzchnię steru A_R ,
- wydłużenie steru λ ,
- prędkość wody dopływającej do steru V_R .

6.6.1. Hipotezy robocze dla wielkości A_R , λ , V_R

Powierzchnia steru A_R

W czasie badań okazało się, że podział na określone typy statków nie daje znacznego wzrostu stopnia dopasowania aproksymacji w stosunku do wartości wzorcowych powierzchni steru. Ostatecznie dla uproszczenia modelu przyjęto funkcję aproksymującą wyznaczoną dla

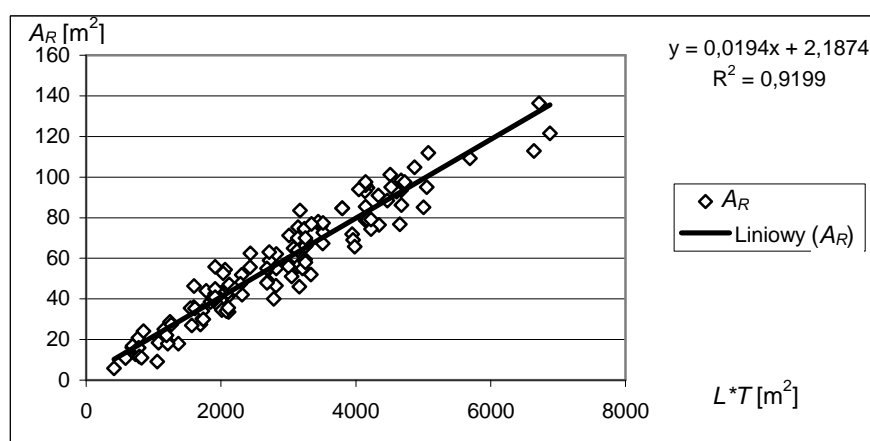
wszystkich statków – bez podziału na typy. W tabeli 6.22 zamieszczono postacie funkcji aproksymacyjnej powierzchni steru oraz stopnie – współczynnik R^2 – stopień dopasowania dla poszczególnych typów statków.

Tabela. 6.22. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji powierzchni steru dla różnych typów statków

Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Wszystkie typy	$A_R = 0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874$	0,9199
Masowce	$A_R = 0,0178 \cdot L \cdot T + 4,077$	0,9225
Kontenerowce	$A_R = 0,0206 \cdot L \cdot T + 3,6268$	0,9238
Zbiornikowce	$A_R = 0,0185 \cdot L \cdot T + 1,711$	0,9560
Statki LNG	$A_R = 0,0164 \cdot L \cdot T + 8,567$	0,8482

Źródło: opracowanie własne.

Przykładowe wyniki uzyskanych aproksymacji powierzchni steru przedstawiono na rysunku 6.40.



Rys. 6.40. Aproksymacja powierzchni steru A_R w zależności od iloczynu długości statku między pionami L oraz zanurzenia T dla różnych typów statków

Źródło: opracowanie własne.

Wydłużenie steru λ

Z przeprowadzonych badań wynikało – wykorzystując dane statków z bazy A – że wydłużenie steru λ w bardzo małym stopniu zależy od wymiarów statków i dla określonych typów statków można przyjąć stałe średnie wartości – tabela 6.23.

Tabela. 6.23. Wartości średniego wydłużenie steru λ dla różnych typów statku

Typ	λ
Masowce	1,695
Kontenerowce	1,795
Zbiornikowce	1,826
Statki LNG	1,741

Źródło: opracowanie własne.

Prędkość wody dopływającej do steru V_R

Zgodnie z algorytmem zawartym w publikacji [41], prędkość V_R dopływającej do steru wody zależy od wielu parametrów, m.in. od obciążenia śruby oraz jej poślizgu. Przyjęto więc, że model aproksymacyjny dla prędkości dopływu wody do steru będzie miał postać:

$$V_R = a + b \cdot V, \quad (6.24)$$

a zależność tę określono na podstawie dokładnych analiz współczynnika obciążenia śruby napędowej oraz poślizgu śruby w funkcji prędkości statku dla poszczególnych typów statków. Tabela 6.24 zawiera wartości współczynników a , b dla prezentowanego modelu aproksymacji V_R dla różnych typów statków.

Tabela. 6.24. Wartości współczynników a , b dla przyjętego modelu aproksymacji V_R dla różnych typów statków

Typ	a	b
Masowce	4,252	0,262
Kontenerowce	5,333	0,329
Zbiornikowce	4,852	0,264
Statki LNG	5,813	0,260

Źródło: opracowanie własne.

6.6.2. Weryfikacja merytoryczna składowych sił dodatkowego oporu od steru

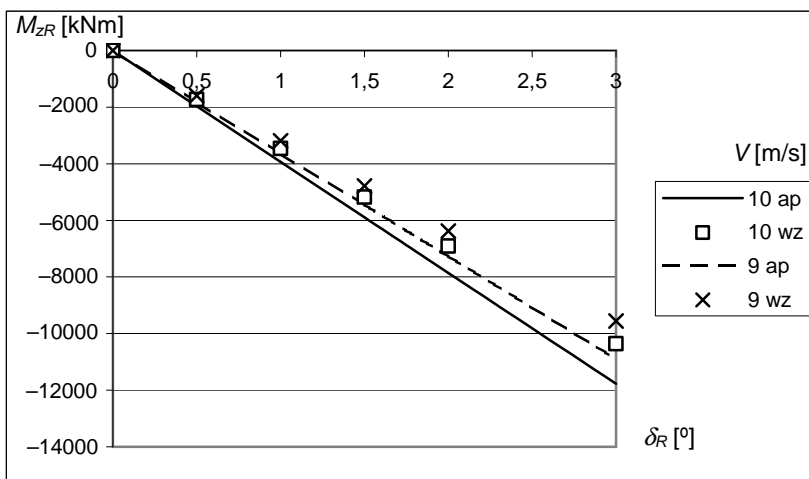
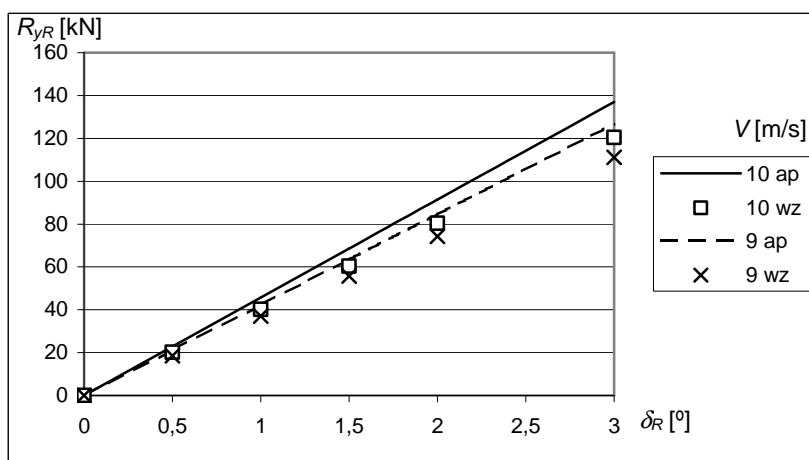
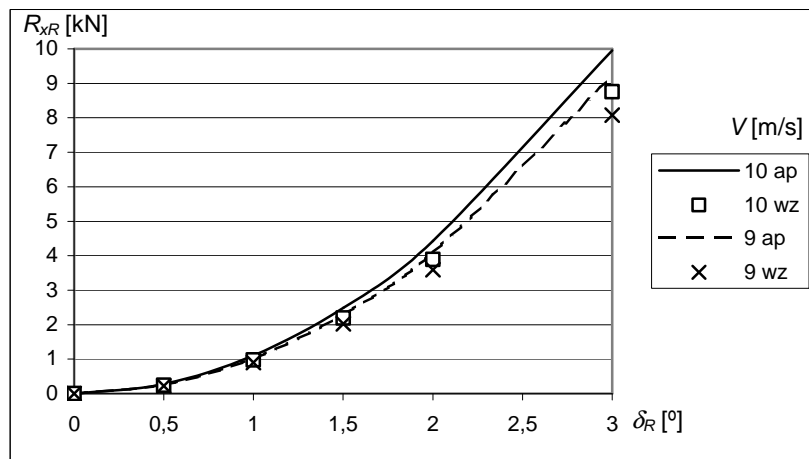
Po uwzględnieniu aproksymacji powierzchni steru A_R , wydłużenia steru λ i prędkości V_R ostateczne wyrażenia na siły i moment na sterze są następujące:

$$\begin{aligned} R_{xR} &= \left| (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin^2 \delta_R \right|, \\ R_{yR} &= \frac{1}{2} (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin 2\delta_R, \\ M_{zR} &= -\frac{1}{4} L (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin 2\delta_R, \end{aligned} \quad (6.25)$$

gdzie $c = \left(\frac{1}{2} \rho_w \frac{6,13\lambda}{\lambda + 2,25} \right)$, a wartości współczynników a , b dla prezentowanego modelu dla różnych typów statków zawarto w tabeli 6.24.

Porównanie wyników obliczeń wykonanych według algorytmu [92], opisanego w rozdziale 5.6, z wynikami otrzymanymi ze wzorów aproksymacyjnych (6.25) dla wybranych statków przedstawiono na rysunkach 6.41 i 6.42.

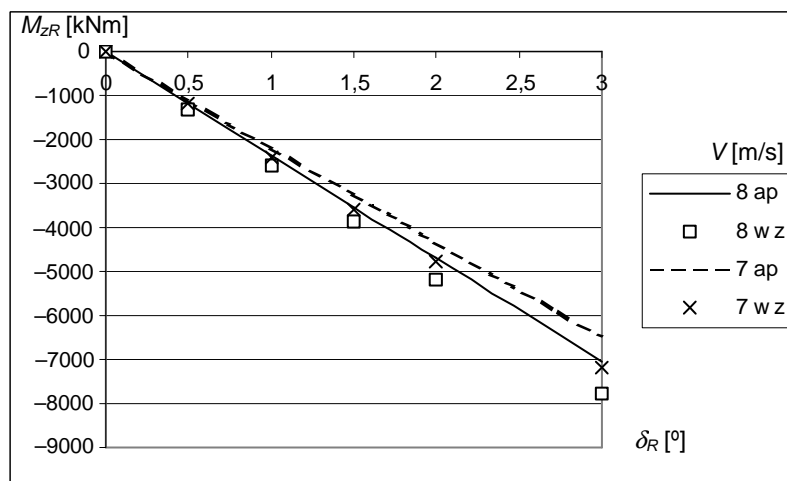
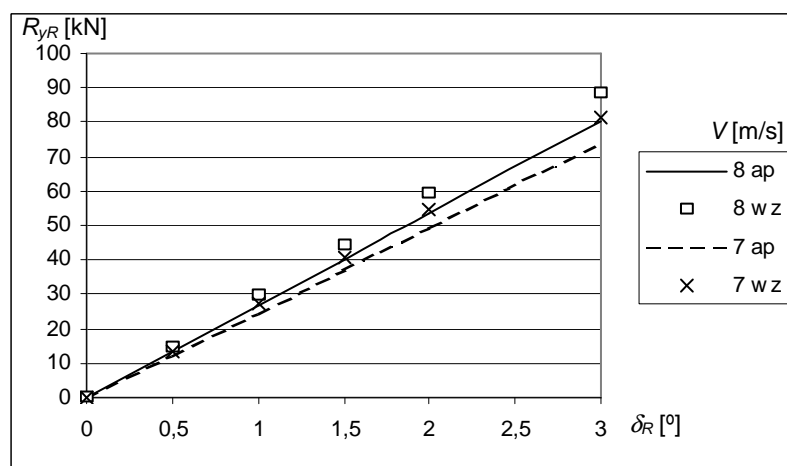
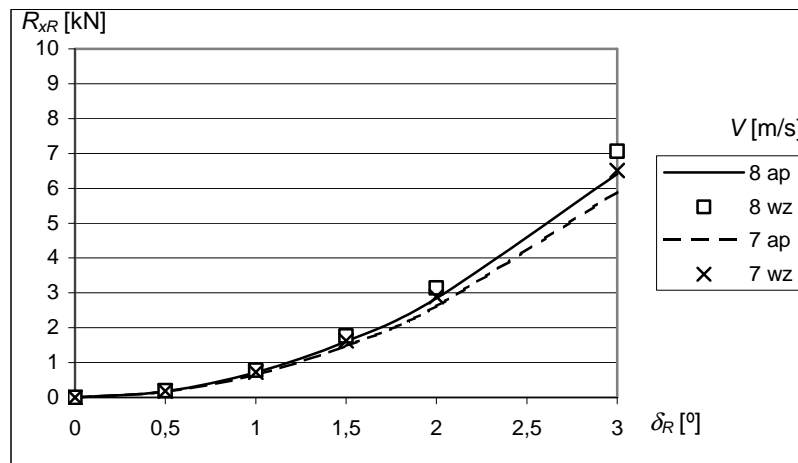
Wyniki testów weryfikacji merytorycznej dla statków z bazy B przedstawiono w publikacji [118].



Objaśnienia: ap – obliczenia według aproksymacji (wzór 6.25),
wz – obliczenia według algorytmu [92].

Rys. 6.41. Siły i moment na sterze pletwowym obliczone dla uzyskanych aproksymacji (wzór 6.25) oraz według algorytmu [92] dla kontenerowca K2 dla dwóch prędkości statku

Źródło: opracowanie własne.



Objaśnienia: ap – obliczenia według aproksymacji (6.25),
wz – obliczenia według algorytmu [92].

Rys. 6.42. Siły i moment na sterze płetwowym obliczone dla uzyskanych aproksymacji (6.25) oraz według algorytmu [92] dla masowca M3 dla dwóch prędkości statku

Źródło: opracowanie własne.

6.7. Końcowa postać modelu aproksymującego całkowity opór statku transportowego

Końcowa postać wzorów aproksymacyjnych składowych sił oporu całkowitego i momentu w funkcji parametrów pogodowych oraz podstawowych parametrów projektowych dla poszczególnych typów statków na linii żeglugowej jest następująca:

Masowce

$$\begin{aligned}
 R_{Cx} = & (0,431942 - 0,026994 \cdot L_{WL} + 0,108922 \cdot B - 0,308537 \cdot T + 5,934741 \cdot C_B + 0,000214 \cdot \nabla + \\
 & + 0,635562 \cdot V - 0,10157 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,00085\beta^2 + 0,07715\beta + 1) - \frac{1}{2} \rho_A \cdot (233,71 \cdot \ln(\nabla) - 1879,3) \cdot V_{RA}^2 \cdot \\
 & \left(0,4770 + 0,1528 \cdot \beta_{RA} - 3,202 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,060 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3 \right) + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + \\
 & + D + \left| (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3498 \cdot (4,252 + 0,262V)^2 \sin^2 \delta_R^2 \right|, \quad (6.26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{Cy} = & \rho_w \cdot L \cdot T \cdot V^2 (8,12 \cdot 10^{-5} \beta^2 + 1,3 \cdot 10^{-3} \beta) + \\
 & + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (895,4 \cdot \ln(\nabla) - 7472,4) \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,01529 + 0,01529 \cdot \beta_{RA} - 8,710 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2) + \\
 & + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \\
 & + \frac{1}{2} (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3498 \cdot (4,252 + 0,262V)^2 \sin^2 \delta_R, \quad (6.27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{Cz} = & 8,55 \cdot 10^{-4} \rho_w \cdot T \cdot L^2 \cdot V^2 \cdot \beta + \\
 & + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (895,4 \cdot \ln(\nabla) - 7472,4) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0071 \cdot \beta_{RA} + 0,0001 \cdot \beta_{RA}^2 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 + 1 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4) + \\
 & + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D - \\
 & - \frac{1}{4} L (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3498 \cdot (4,252 + 0,262V)^2 \sin^2 \delta_R, \quad (6.28)
 \end{aligned}$$

Kontenerowce

$$\begin{aligned}
 R_{Cx} = & (-10,1163 + 0,0103 \cdot L_{WL} + 0,3544 \cdot B - 0,0320 \cdot T + 17,4097 \cdot C_B + 3,65 \cdot 10^{-5} \cdot \nabla - 1,8620 \cdot V + \\
 & + 0,1391 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0008\beta^2 + 0,0661\beta + 1) - \\
 & - \frac{1}{2} \rho_A \cdot (467,7 + 0,0093 \cdot \nabla) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,47676 + 0,00991 \cdot \beta_{RA} - 2,5026 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 9,2900 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3) + \\
 & + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \left| (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3941 \cdot (5,333 + 0,329V)^2 \sin^2 \delta_R^2 \right|. \quad (6.29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{Cy} = & \rho_w \cdot L \cdot T \cdot V^2 (1,36 \cdot 10^{-4} \beta^2 + 1,56 \cdot 10^{-3} \beta) + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (1848,1 + 0,0628 \cdot \nabla) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,01991 \cdot \beta_{RA} - 1,1108 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \\
& + \frac{1}{2} (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3941 \cdot (5,333 + 0,329V)^2 \sin 2\delta_R.
\end{aligned} \tag{6.30}$$

$$\begin{aligned}
M_{Cz} = & 1,10 \cdot 10^{-3} \rho_w \cdot T \cdot L^2 \cdot V^2 \cdot \beta + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (1848,1 + 0,0628 \cdot \nabla) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0048 \cdot \beta_{RA} + 1,056 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - 5,181 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D - \\
& - \frac{1}{4} L (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3941 \cdot (5,333 + 0,329V)^2 \sin 2\delta_R.
\end{aligned} \tag{6.31}$$

Zbiornikowce

$$\begin{aligned}
R_{Cx} = & (-10,0598 + 0,0272 \cdot L_{WL} + 0,2910 \cdot B - 0,1247 \cdot T + 12,9654 \cdot C_B + 0,00004 \cdot \nabla - 0,9491 \cdot V + \\
& + 0,0613 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0008 \beta^2 + 0,0681 \beta + 1) - \\
& - \frac{1}{2} \rho_A \cdot (252,14 \cdot \ln(\nabla) - 2049,4) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,4849 + 0,0150 \cdot \beta_{RA} - 3,139 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,0363 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \left| (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,4074 \cdot (4,852 + 0,264 \cdot V)^2 \sin^2 \delta_R \right|.
\end{aligned} \tag{6.32}$$

$$\begin{aligned}
R_{Cy} = & \rho_w \cdot L \cdot T \cdot V^2 (4,48 \cdot 10^{-5} \beta^2 + 1,37 \cdot 10^{-3} \beta) + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (648,93 \cdot \ln(\nabla) - 4987,2) \cdot V_{RA}^2 \cdot (0,0151 \cdot \beta_{RA} - 8,674 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \\
& + \frac{1}{2} (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,4074 \cdot (4,852 + 0,264 \cdot V)^2 \sin 2\delta_R.
\end{aligned} \tag{6.33}$$

$$\begin{aligned}
M_{Cz} = & 8,78 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_w \cdot T \cdot L^2 \cdot V^2 \cdot \beta + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (648,93 \cdot \ln(\nabla) - 4987,2) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,0054 \cdot \beta_{RA} + 6,675 \cdot 10^{-5} \cdot \beta_{RA}^2 - 2,057 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D - \\
& - \frac{1}{4} L (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,4074 \cdot (4,852 + 0,264 \cdot V)^2 \sin 2\delta_R.
\end{aligned} \tag{6.34}$$

Statki LNG

$$\begin{aligned}
R_{Cx} = & (-9,08923 + 0,02803 \cdot L_{WL} + 0,18527 \cdot B - 0,33747 \cdot T + 15,6909 \cdot C_B + 0,00007 \cdot \nabla - 0,67414 \cdot V + \\
& + 0,02604 \cdot V^2) \cdot V^2 \cdot (-0,0009\beta^2 + 0,0736\beta + 1) - \\
& - \frac{1}{2} \rho_A \cdot (515,89 \cdot \ln(\nabla) - 4490,3) \cdot V_{RA}^2 \cdot (1,2582 + 0,0068 \cdot \beta_{RA} - 4,1537 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 + 1,6750 \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RA}^3) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \left| (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3705 \cdot (5,813 + 0,260 \cdot V)^2 \sin \delta_R^2 \right|. \quad (6.35)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{Cy} = & \rho_w \cdot L \cdot T \cdot V^2 (1,46 \cdot 10^{-4} \beta^2 - 9,75 \cdot 10^{-4} \beta) + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (2473,8 \cdot \ln(\nabla) - 21947,0) \cdot V_{RA}^2 \cdot (-0,1490 \cdot \beta_{RA} + 0,0288 \cdot \beta_{RA} - 0,0002 \cdot \beta_{RA}^2) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D + \\
& + \frac{1}{2} (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3705 \cdot (5,813 + 0,260 \cdot V)^2 \sin 2\delta_R. \quad (6.36)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{Cz} = & \rho_w \cdot T \cdot L^2 \cdot V^2 \cdot (0,00002\beta^2 + 0,0002\beta - 0,0004) + \\
& + \frac{1}{2} \rho_A \cdot (2473,8 \cdot \ln(\nabla) - 21947,0) \cdot L \cdot V_{RA}^2 \cdot \\
& \cdot (-0,0075 \cdot \beta_{RA} + 1,5069 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{RA}^2 - 9,19 \cdot 10^{-7} \cdot \beta_{RA}^3 + 2,0 \cdot 10^{-9} \cdot \beta_{RA}^4) + \\
& + \sum_{i=1}^{11} \left(c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \left(\sum_{k=1}^9 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) \right) + D - \\
& - \frac{1}{4} L (1,14 - 0,6 \cdot C_B) \cdot (0,0194 \cdot L \cdot T + 2,1874) \cdot 1,3705 \cdot (5,813 + 0,260 \cdot V)^2 \sin 2\delta_R. \quad (6.37)
\end{aligned}$$

gdzie x_k są kolejnymi argumentami, natomiast a , b , c , D parametrami sztucznych sieci neuronowych opracowanych do aproksymacji sił i momentu od falowania – rozdział 6.5.

6.8. Wnioski z opracowanych modeli parametrycznych całkowitego oporu statku

– Przedstawiona końcowa postać wzorów aproksymujących (6.26–6.37) całkowity opór statku podczas rejsu na zadanej linii żeglugowej jest wprawdzie dość złożona, ale składowe oporu R_x , R_y oraz moment M_z są uzależnione tylko od podstawowych parametrów geometrycznych statku znanych na etapie projektowania wstępnego.

– Liczba podstawowych parametrów geometrycznych, użytych w opracowanych wzorach aproksymacyjnych, jest zdecydowanie mniejsza niż w innych znanych metodach przybliżonych i nie przekracza liczby parametrów wymienionych w rozdziale 3.6. **Stąd opracowane aproksymacje mogą być łatwo stosowane w projektowaniu wstępnym statku.**

– Z przeprowadzonych testów wynika, że opracowany model aproksymacyjny jest wystarczająco dokładny, aby mógł być wykorzystany w projektowaniu wstępnym statku. Także porównanie nowo opracowanych aproksymacji składników całkowitego oporu z innymi aproksymacjami, przedstawionymi w literaturze, wskazuje, że są dokładniejsze (rys. 6.7 – opór na wodzie spokojnej w ruchu prostoliniowym [1, 42]; rys. 6.37 – dodatkowy opór od fali [12]).

– Wysoką dokładność końcowego modelu parametrycznego osiągnięto, wykorzystując głównie regresję wielokryterialną. Tylko do aproksymacji dodatkowego oporu od falowania zastosowano sztuczne sieci neuronowe, dla których uzyskano największą dokładność.

– Poszczególne składowe całkowitego oporu, wyliczone z wzorów aproksymacyjnych, obarczone są pewnymi błędami, ale ostatecznie błąd oszacowania całkowitego oporu dla statków wzorcowych był rzędu kilku procent. Największe błędy względne uzyskano, poszukując aproksymacji sił i momentu na sterze płetwowym, jednak wpływ tych składowych na całkowity opór statku jest niewielki.

7. WYZNACZANIE NAPORU ŚRUBY I MOCY NAPĘDU STATKU W RZECZYWISTYCH WARUNKACH POGODOWYCH

7.1. Napór śruby okrętowej

7.1.1. Napór śruby całkowicie zanurzonej

Napór śruby odosobnionej (bez kadłuba statku) można obliczyć ze wzoru:

$$T = K_T \rho_w D_p^4 n_p^2, \quad (7.1)$$

gdzie:

D_p – średnica śruby,

n_p – prędkość obrotowa śruby,

K_T – współczynnik naporu, który dla typowych śrub B-Wageningen o danych parametrach: (P/D_p) – współczynnik skoku, (A_E/A_0) – współczynnik powierzchni wyprostowanej, Z – liczba skrzydeł, jest aproksymowany wyrażeniem:

$$K_T = A_0 + A_1 \cdot J + A_2 J^2 + A_3 \cdot J^3, \quad (7.2)$$

gdzie:

A_0, A_1, A_2, A_3 – współczynniki wielomianu opisującego charakterystykę naporu, uzależnione od (P/D_p) , (A_E/A_0) , Z , [55] (wpływ parametrów geometrycznych kadłuba na charakterystyki śruby przedstawiono w publikacji [73],

J – współczynnik posuwu:

$$J = \frac{V[1 - w_T(V)]}{D_p \cdot n_p}, \quad (7.3)$$

gdzie:

$w_T(V)$ – współczynnik strumienia nadążającego, uzależniony od prędkości statku V .

Na pracującej śrubie powstaje moment obrotowy Q :

$$Q = K_Q \rho_w D_p^5 n_p^2, \quad (7.4)$$

gdzie K_Q jest współczynnikiem momentu i podobnie jak współczynnik naporu można go przedstawić, dla danej śruby, w postaci:

$$K_Q = B_0 + B_1 \cdot J + B_2 \cdot J^2 + B_3 \cdot J^3, \quad (7.5)$$

gdzie B_0, B_1, B_2, B_3 są współczynnikami wielomianu opisującego charakterystykę momentu, uzależnione od parametrów śruby: (P/D_p) , (A_E/A_0) , Z [55].

Dla śrub o innej geometrii niż B-Wageningen, współczynniki K_T i K_Q mogą być aproksymowane wyrażeniami (7.2) i (7.5), a współczynniki A i B występujące w tych wyrażeniach

muszą być określone na podstawie badań modelowych lub obliczeń programami komputerowymi do projektowania śrub okrętowych [65, 66].

Moc doprowadzona do śruby odosobnionej jest równa:

$$P_D = 2\pi n_p Q. \quad (7.6)$$

Sprawność śruby odosobnionej (bez kadłuba statku) jest równa:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}. \quad (7.7)$$

Do numerycznego prognozowania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego mogą być wykorzystane: rzeczywista charakterystyka oporowa i napędowa (otrzymana z badań modelowych) lub przybliżone charakterystyki otrzymane np. z metody Holtropa-Mennena [36–39]. W tej drugiej sytuacji charakterystyki hydrodynamiczne śruby napędowej, obliczone według publikacji [55], należy przy przeliczaniu na statek skorygować ze względu na efekt skali pomiędzy modelem a śrubą rzeczywistą [39]:

$$K_{TS} = K_T + \Delta C_D \cdot 0,3 \frac{P \cdot c_{0,75} \cdot Z}{D_p^2}, \quad (7.8)$$

$$K_{QS} = K_Q - \Delta C_D \cdot 0,25 \frac{c_{0,75} \cdot Z}{D_p},$$

$$\Delta C_D = \left(2 + 4 \left(\frac{t}{c} \right)_{0,75} \right) \left\{ 0,003605 - \left(1,89 + 1,62 \cdot \lg \left(\frac{c_{0,75}}{k_p} \right) \right)^{-2,5} \right\}, \quad (7.9)$$

gdzie:

K_T, K_Q – współczynniki: naporu i momentu obliczone według publikacji [55],

K_{TS}, K_{QS} – skorygowane dla statku współczynniki: naporu i momentu,

P – skok śruby napędowej,

$c_{0,75}$ – cięciwa skrzydła śruby napędowej na promieniu $r = 0,75R$,

$(t/c)_{0,75}$ – stosunek grubości skrzydła śruby do cięciwy na promieniu $r = 0,75R$,

k_p – chropowatość powierzchni skrzydła śruby, dla śrub nowych $k_p = 0,0003$ m [39].

7.1.2. Spadek naporu podczas wynurzania się śruby

Przedstawione w rozdziale 7.1.1 wyrażenia na napór śruby napędowej są słuszne dla statku, który płynie na wodzie spokojnej lub na sfalowanej wodzie, ale powstające kołysania i ruchy względne są na tyle małe, że nie występuje wynurzanie się śruby. Podczas pływania na fali przy dużych kołysaniach i ruchach względnych śruba pracuje w bardzo zapowietrzonej wodzie lub wynurza się z wody (rys. 7.1). Powoduje to wahania chwilowej wartości naporu i spadek średniej, efektywnej wartości naporu w stosunku do naporu na wodzie spokojnej (nawet jeżeli statek płynie ze stałą prędkością oraz stała jest prędkość obrotowa śruby).

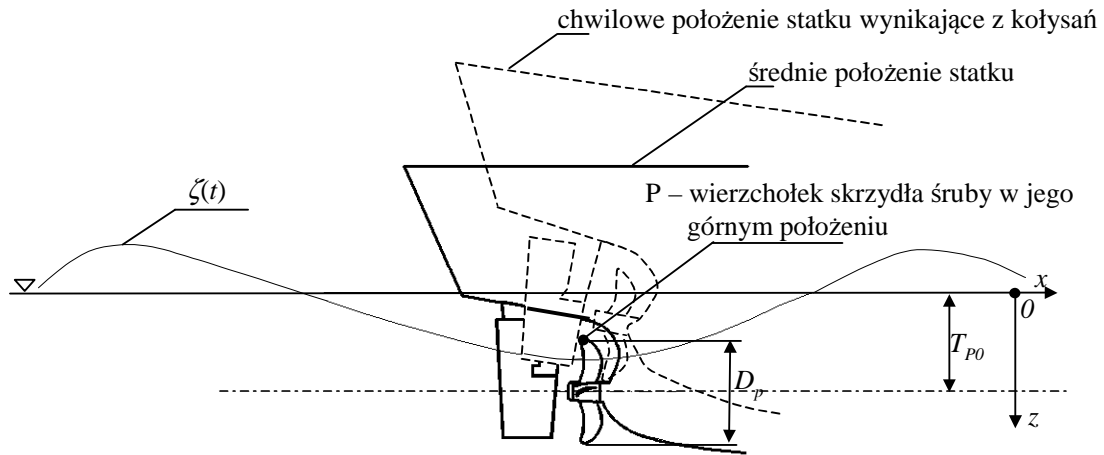
Ruch względny R_{zP} punktu P (wierzchołek skrzydła śruby w jego górnym położeniu – rys. 7.2), obliczany w ramach liniowej teorii kołysań statku, może być przedstawiony w postaci:

$$R_{zP}(t) = R_{(zP)A} \sin[\omega_E t - \delta_{RzP}(\omega_E)], \quad (7.10)$$

gdzie:

$R_{(zP)A}$ – amplituda pionowego ruchu względnego punktu P,

$\delta_{RzP}(\omega_E)$ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy rzędną ruchu względnego a rzędną fali.



Rys. 7.1. Wpływ ruchu względnego na wynurzanie się śruby napędowej

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie ruchu względnego oraz położenia śruby (dokładnie wierzchołka skrzydła śruby – punkt P, rys. 7.1) można obliczyć kiedy, na jaką wysokość i jak długo będzie trwało wynurzanie się śruby. Wynurzenie się śruby na wysokość h_{ws} będzie wtedy, gdy:

$$h_{ws}(t) = R_{zP}(t) - T_{zS}(t) > 0, \quad (7.11)$$

gdzie T_{zS} jest zanurzeniem wierzchołka skrzydła śruby w jego górnym położeniu:

$$T_{zS} = T_{P0} - 0,5D_p, \quad (7.12)$$

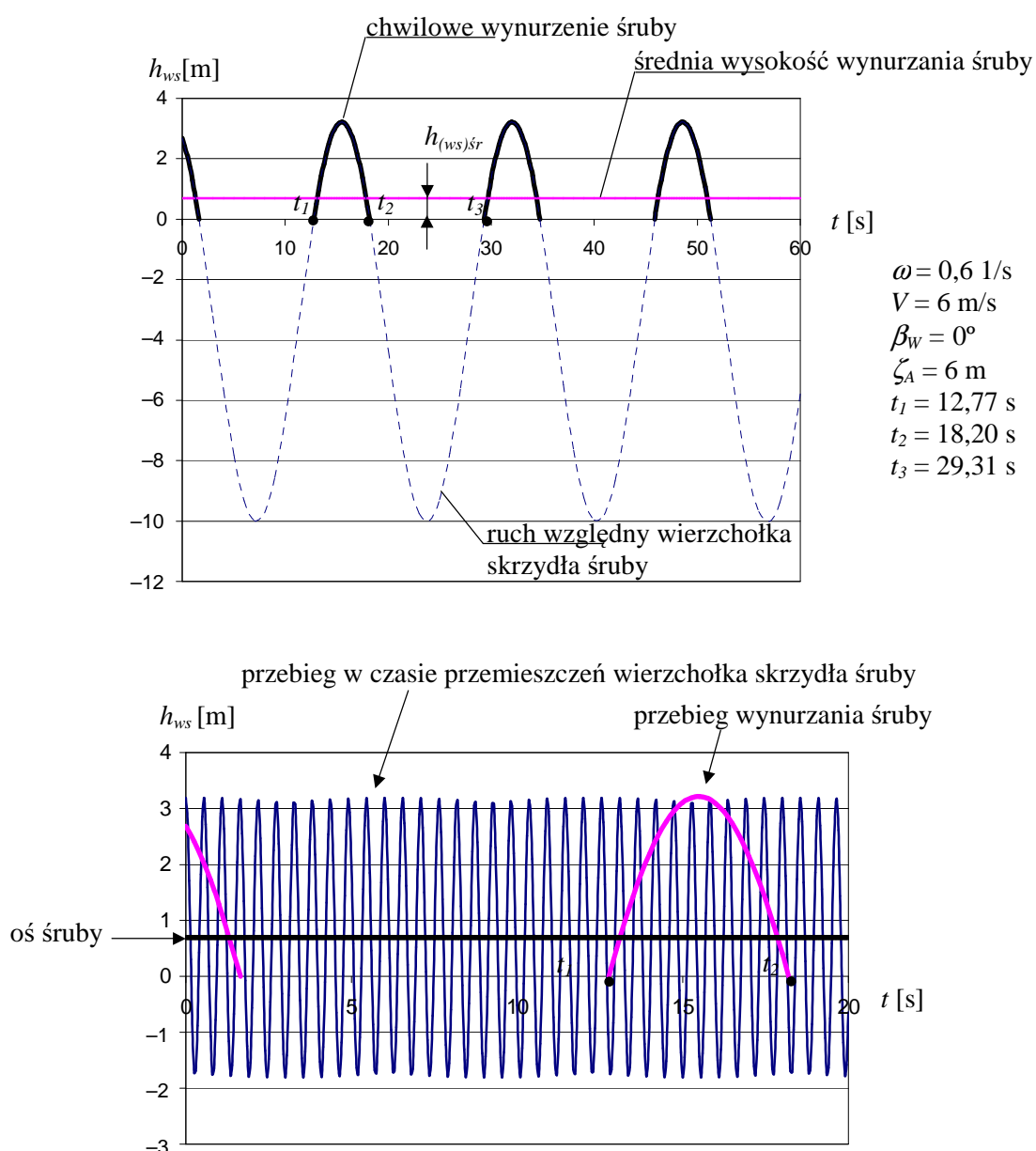
gdzie:

T_{P0} – zanurzenie osi śruby (rys. 7.1),

D_p – średnica śruby.

Przykładowy przebieg wynurzania się śruby na fali regularnej przedstawiono na rysunku 7.2.

W czasie wynurzania się śruby część powierzchni jej skrzydeł nie będzie w wodzie tylko w powietrzu – na tych skrzydłach siła nośna, a w konsekwencji siła naporu, będzie inna niż na skrzydłach będących w wodzie, czyli praktycznie zerowa. Wypadkowa siła naporu śruby wynurzającej się będzie się zmniejszać w stosunku do naporu śruby całkowicie zanurzonej.

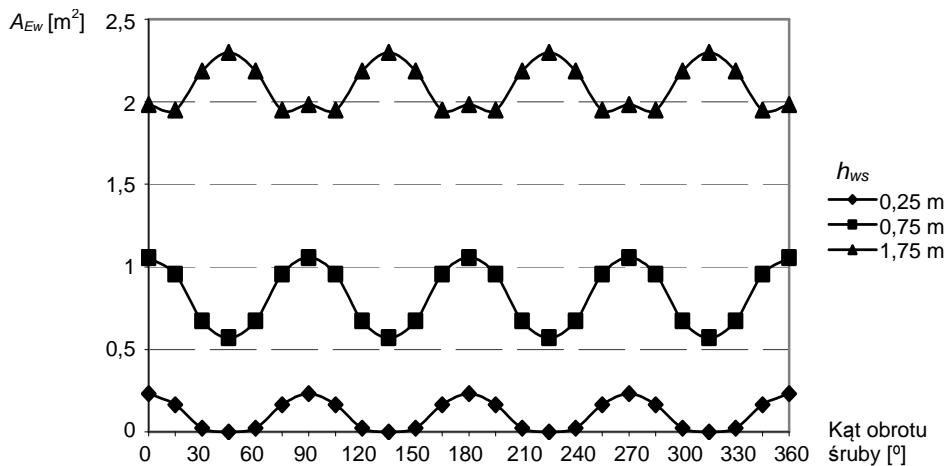


Rys. 7.2. Ruch względny, wysokość wynurzenia i przebieg w czasie przemieszczeń wierzchołka skrzydła śruby w jego górnym położeniu

Źródło: opracowanie własne.

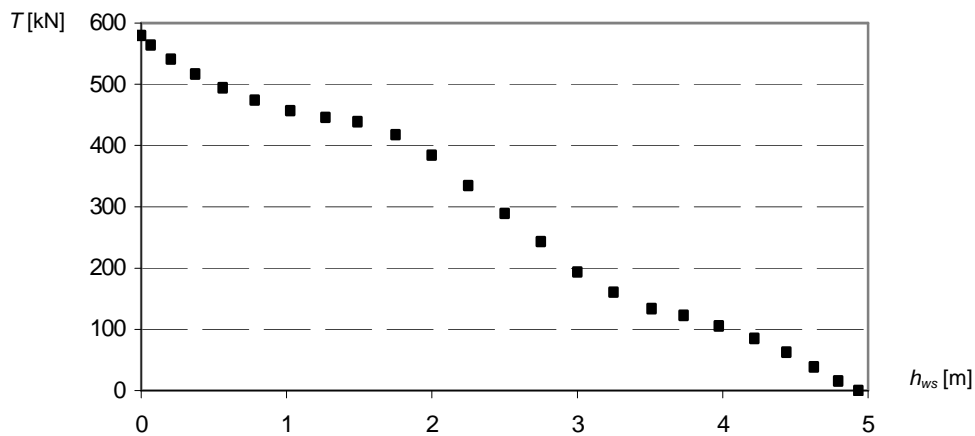
Na podstawie przebiegu w czasie wynurzenia się śruby napędowej (rys. 7.2) obliczyć można przebieg w czasie wynurzanej powierzchni śruby (rys. 7.3), a następnie zmianę (spadek) naporu w trakcie wynurzenia się śruby (rys. 7.4).

Szczegóły tego algorytmu obliczeniowego zamieszczone zostały w publikacjach [116, 117, 119].



Rys. 7.3. Powierzchnia wynurzona skrzydeł śruby dla różnych położen kątowych dla trzech wysokości wynurzenia (jeden pełen obrót śruby)

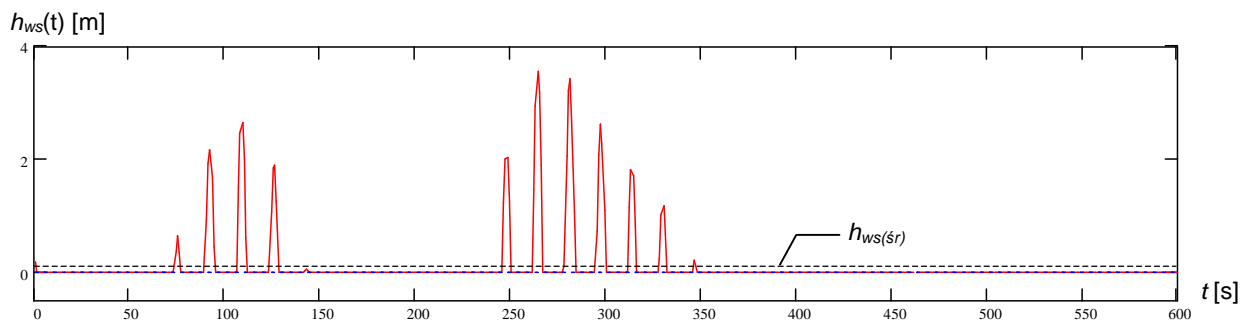
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.4. Średni napór śruby w zależności od wysokości wynurzenia śruby ($D_p = 5$ m)

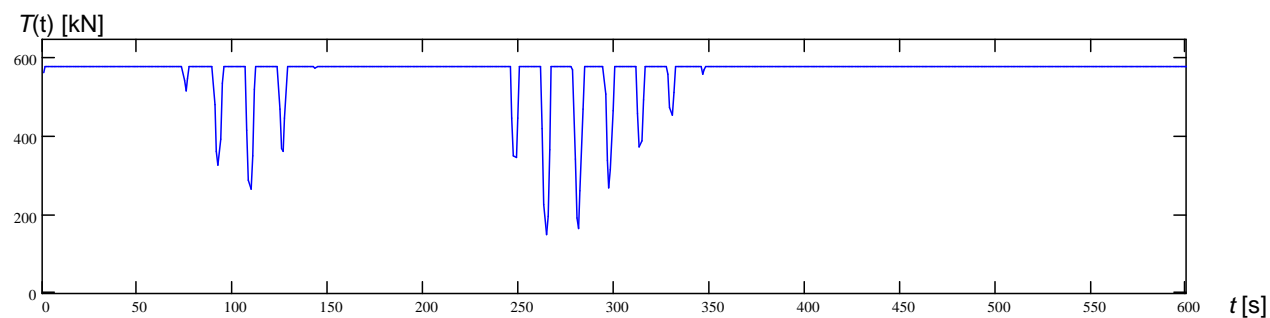
Źródło: opracowanie własne.

Prowadząc symulacje kołysań i ruchów względnych statku na fali nieregularnej w podobny sposób można obliczyć wynurzenie się śruby (rys. 7.5) oraz zmiany naporu (rys. 7.6) na fali nieregularnej.



Rys. 7.5. Wynurzenie się wierzchołka skrzydła śruby na fali nieregularnej dla 8° B ($H_s = 5,25$ m, $T_l = 8,5$ s) i $\beta_W = 0^\circ$, $h_{ws}(sr) = 0,03$ m

Źródło: opracowanie własne.

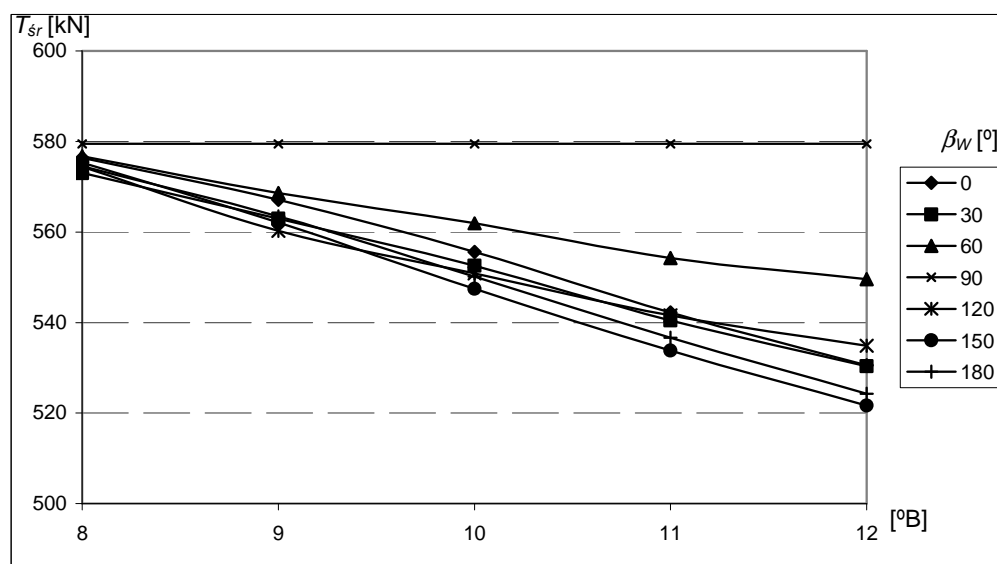


Rys. 7.6. Przebieg w czasie zmian naporu śruby na fali nieregularnej dla 8°B ($H_s = 5,25 \text{ m}$, $T_l = 8,5 \text{ s}$) i $\beta_w = 0^\circ$

Źródło: opracowanie własne.

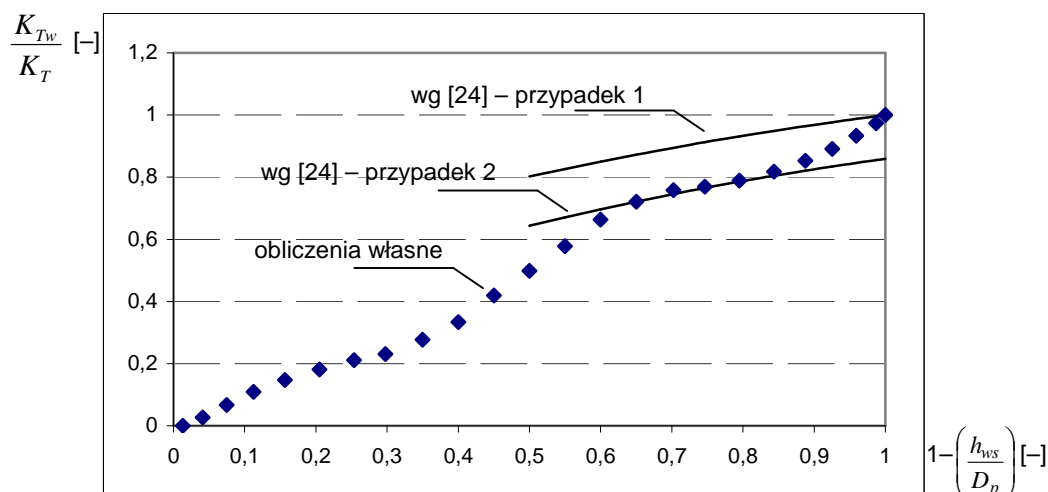
Średni spadek naporu na śrubie w trakcie jej wynurzeń dla różnych stanów morza i kierunkach fali regularnej względem statku pokazano na rysunku 7.7.

Otrzymane wyniki własnych obliczeń porównano (rys. 7.8) z wynikami pomiarów przedstawionych w publikacjach [24, 53].



Rys. 7.7. Zmiana naporu podczas wynurzania się śruby na fali nieregularnej dla różnych stanów morza oraz kierunków β_w fali względem statku ($V = 6 \text{ m/s}$)

Źródło: opracowanie własne.



przypadek 1 – obniżenie naporu tylko w wyniku wynurzenia się śruby,

przypadek 2 – obniżenie naporu w wyniku: wynurzenia się śruby, generowania rufowego układu falowego, zmiennej siły nośnej na skrzydle śruby,

K_{Tw} – współczynnik naporu dla śruby wynurzającej się,

K_T – współczynnik naporu dla śruby całkowicie zanurzonej.

Rys. 7.8. Porównanie wyników własnych obliczeń spadków naporu przy wynurzeniu się śruby z wynikami zawartymi w publikacji [24]

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych oraz publikacji [24].

7.2. Sprawność napędowa i pole pracy silnika

Ogólną sprawność napędową statku można przedstawić w postaci:

$$\eta = \frac{P_E}{P_B}, \quad (7.13)$$

gdzie:

P_E – moc holowania statku,

$$P_E = V \cdot R_C, \quad (7.14)$$

P_B – moc na sprzęgle silnika napędu głównego.

Moc jest przekazywana z silnika za pośrednictwem linii wałów i śruby napędowej, w której wytwarzany jest napór o takiej wartości aby statek mógł uzyskać prędkość V . Stąd ogólną sprawność napędową można przedstawić w postaci:

$$\eta = \eta_G \cdot \eta_S \cdot \eta_{HT} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{RT}, \quad (7.15)$$

gdzie:

η_G – sprawność przekładni o ile jest zastosowana,

η_S – sprawność linii wałów,

η_{HT} – „sprawność” kadłuba:

$$\eta_{HT} = \frac{1-t}{1-w_T}, \quad (7.16)$$

η_0 – sprawność odosobnionej śruby napędowej,

η_{RT} – „sprawność” rotacyjna („sprawność” rotacyjna może zmieniać się w zależności od prędkości statku $\eta_{RT}(V)$).

Pomiędzy momentem na śrubie odosobnionej (wzór 7.4) a mocą doprowadzoną do stożka śruby odosobnionej (P_D) jest następujący związek:

$$P_D = Q \cdot 2\pi n_p, \quad (7.17)$$

a pomiędzy mocą P_D a mocą silnika napędowego:

$$P_D = N \cdot \eta_G \cdot \eta_S \cdot \eta_{RT}, \quad (7.18)$$

gdzie: $N = P_B$ – moc silnika napędowego.

Dla projektowanego statku tak dobiera się moc silnika, aby punkt pracy układu napędowego dla prędkości kontraktowej na wodzie spokojnej wynosił około $0,90 N_n$ (mocy nominalnej silnika – rys. 7.9). W rzeczywistych warunkach pogodowych, kiedy na statek oddziałują wiatr i falowanie oraz pojawia się dodatkowy opór ΔR od warunków atmosferycznych, to punkt pracy układu napędowego będzie zmieniał swoje położenie na polu pracy silnika napędowego. Sterując dawką paliwa (a tym samym prędkością obrotową silnika i śruby), punkt pracy może znajdować się w obszarze pracy ciągłej (pole zielone – rys. 7.9) lub w obszarze pracy ograniczonej przy przeciążeniu silnika (pole żółte lub czerwone – rys. 7.9).

Poszczególne pola są ograniczone charakterystykami silnika w postaci:

$$N = k_m \cdot n^m, \quad (7.19)$$

gdzie:

N – moc silnika,

k_m – współczynnik dla danej charakterystyki,

n – prędkość obrotowa silnika,

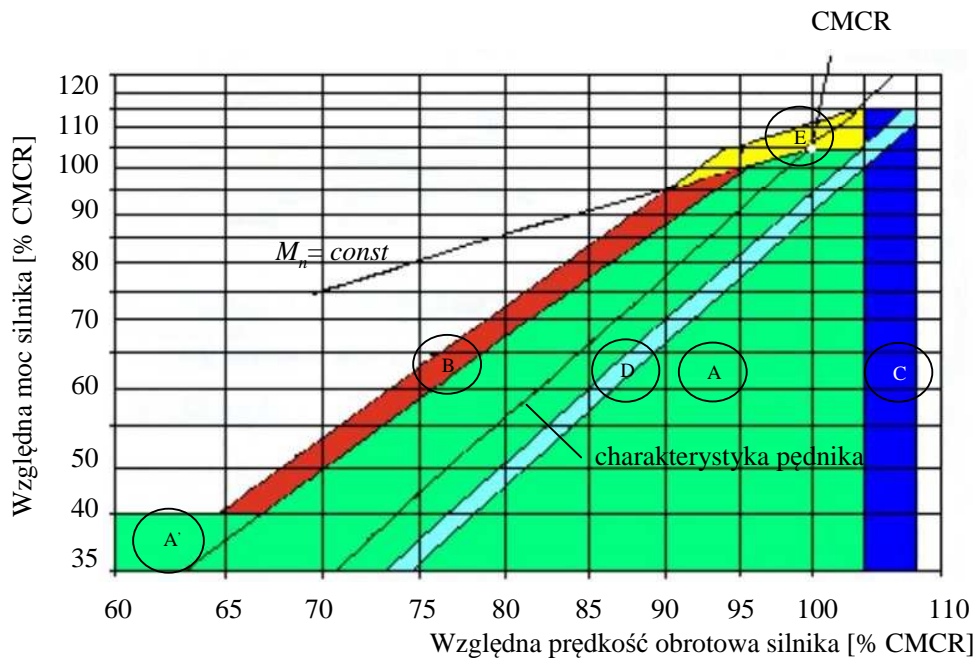
m – wykładnik, który zależy od typu silnika dla danego producenta; dla wolnoobrotowych silników firmy Sulzer typu RTA 52, RTA 62, RT 72, RTA 84,

$m = 0$ – dla stałej mocy nominalnej lub maksymalnej,

$m = 1$ – dla charakterystyki stałego momentu,

$m = 2,45$ – dla charakterystyki przeciążeniowej.

Poszczególne charakterystyki, jak i zakres prędkości obrotowej silnika, są określone w zależności od typu (producenta) silnika napędowego.



- Objaśnienia: M_n – moment nominalny,
 (A) – pole (zielone) pracy ciągłej,
 (B) – pole (czerwone) przeciążenia silnika,
 (C) – pole (niebieskie) pracy optymalnej silnika na wodzie spokojnej,
 (D) – pole (żółte) pracy chwilowej,
 (E) – pole (granatowe) pracy silnika w warunkach prób morskich.

Rys. 7.9. Pole pracy silnika napędowego firmy Sulzer

Źródło: opracowanie własne na podstawie [26].

7.3. Zmiana punktu pracy układu napędowego pod wpływem dodatkowego oporu

Możliwości zmiany punktu pracy układu napędowego (śruba o skoku ustalonym) wywołane przyrostem dodatkowego oporu, w tym przypadku od wiatru (statek płynie pod wiatr), przedstawiono na rysunku 7.10. W tym przykładzie w pozycji wyjściowej (punkt B) statek płynie na wodzie spokojnej z prędkością V_B i prędkością obrotową śruby n_B , a prędkość wiatru $V_A = 0$ m/s. Następnie od wiatru wiejącego z prędkością $V_A = 10$ m/s od dziobu powstaje dodatkowy opór. Są możliwe następujące drogi przejścia z dotychczasowego punktu pracy (punkt B) do nowego punktu pracy (punkt C) układu napędowego (rys. 7.10):

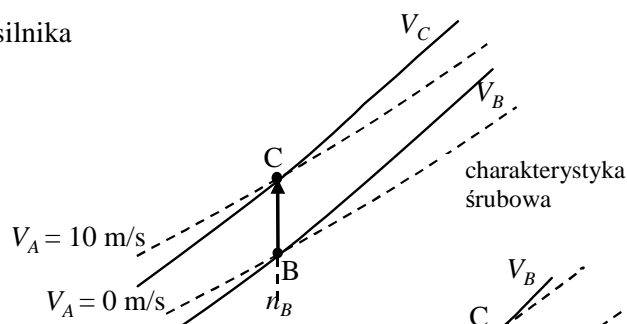
- zachowując stałą prędkość obrotową n_B , zwiększa się dawkę paliwa (rośnie moc silnika) aż do osiągnięcia punktu C na charakterystyce V_A , prędkość statku spada do wartości V_C ;
- zachowując stałą prędkość statku V_B , zwiększa się dawkę paliwa (rośnie moc silnika i prędkość obrotowa do wartości n_C) aż do osiągnięcia punktu C (stałą prędkość statku można utrzymać aż do krzywej granicznej dla danego silnika);
- zachowując stałą moc silnika, osiąga się punkt C, zmniejsza się prędkość statku do V_C oraz prędkość obrotową silnika do n_C ;

d) utrzymując stałe jednostkowe zużycie paliwa aż do osiągnięcia punktu C, zmniejsza się prędkość statku i prędkość obrotową silnika.

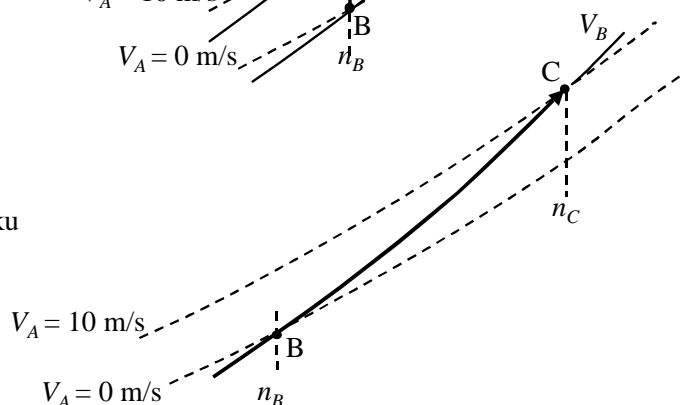
Wymienione cztery możliwości osiągnięcia nowego punktu pracy układu napędowego statku przy wzroście oporu – w tym przypadku prędkości wiatru – mogą być stosowane przy różnych przyjętych kryteriach, np.: stałej prędkości statku, maksymalnej, możliwej do osiągnięcia, prędkości statku, minimalnego zużycia paliwa czy stałej lub maksymalnej sprawności śruby napędowej.

Przy określaniu średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku, przy wzroście oporu wynikającego z warunków pogodowych, będzie stosowany w pierwszej kolejności wariant „b”, czyli zachowanie stałej, początkowej prędkości statku aż do osiągnięcia charakterystyki granicznej (rys. 7.9). Przy dalszym wzroście dodatkowego oporu punkt pracy układu napędowego będzie poszukiwany na charakterystyce granicznej – czyli będzie poszukiwana maksymalna, możliwa do osiągnięcia, prędkość statku. Algorytm poszukiwania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku został przygotowany tak, aby możliwe były do zastosowania także inne warianty (kryteria) wyboru nowego punktu pracy, przedstawione na rysunku 7.10.

a) stała prędkość obrotowa silnika



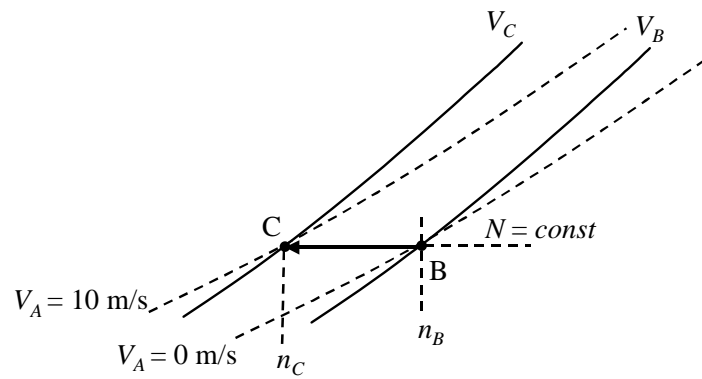
b) stała prędkość statku



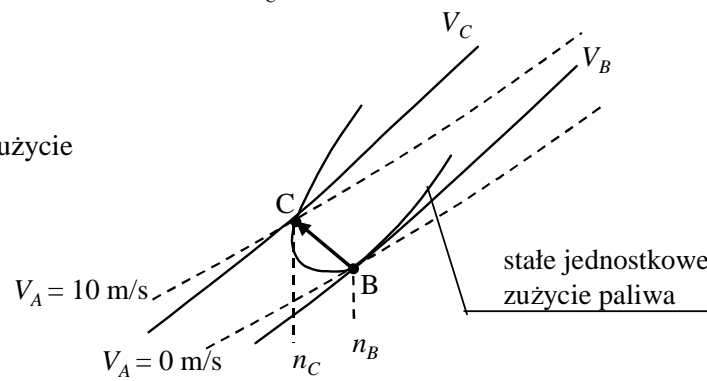
Rys. 7.10. Przykłady zmiany punktu pracy układu napędowego w wyniku wzrostu dodatkowego oporu spowodowanego warunkami pogodowymi

Źródło: opracowanie własne.

c) stała moc silnika



d) stałe jednostkowe zużycie paliwa



Rys. 7.10. Przykłady zmiany punktu pracy układu napędowego w wyniku wzrostu dodatkowego oporu spowodowanego warunkami pogodowymi (cd.)

8. MODEL PARAMETRYCZNY NAPORU I MOCY NAPĘDU STATKU TRANSPORTOWEGO

8.1. Wstęp

Przedstawiony w rozdziale 7. matematyczny model napędu statku transportowego jedno-śrubowego składa się z:

- nieliniowych równań opisujących napór śruby napędowej całkowicie zanurzonej oraz algorytmu obliczania spadku tego naporu podczas wynurzenia się śruby;
- nieliniowych równań opisujących moment na śrubie, który obciąża silnik napędowy;
- równań opisujących sprawność napędową, w tym współczynniki: ssania t , strumienia nadążającego w_T i „sprawność” rotacyjną η_{RT} ;
- równań opisujących pole pracy silnika napędowego oraz różne algorytmy zmian punktu pracy układu napędowego podczas zmian (przyrostu) oporu w rzeczywistych warunkach pogodowych – wybór algorytmu zmian punktu pracy układu napędowego wynika z przyjęcia jednego z różnych kryteriów.

Wyznaczenie parametrów układu napędowego podczas pływania statku w rzeczywistych warunkach pogodowych wymaga znajomości:

- charakterystyk hydrodynamicznych śruby napędowej,
- charakterystyk częstotliwościowych ruchów względnych statku na fali, od których zależą wynurzenia się śruby,
- współczynników charakteryzujących współpracę śruby napędowej z kadłubem statku,
- nominalnej: mocy i prędkości obrotowej oraz typu silnika napędowego.

Wszystkie te wielkości, poza parametrami silnika napędowego, są obliczane skomplikowanymi programami komputerowymi lub określone podczas badań doświadczalnych w basenie modelowym. W obu tych podejściach niezbędna jest pełna geometria śruby napędowej oraz kadłuba statku.

Na etapie projektowania wstępnego brak jest pełnej geometrii śruby i kadłuba, a tym bardziej brak jest badań modelowych. W rozdziale tym przedstawiono więc model aproksymacyjny umożliwiający obliczanie wszystkich parametrów układu napędowego podczas pływania statku w rzeczywistych warunkach pogodowych. Model ten jest uzależniony tylko od podstawowych parametrów kadłuba, znanych na etapie projektowania wstępnego.

Przy poszukiwaniu funkcji aproksymujących parametry napędu statku zastosowano takie same zasady i algorytmy (rozdz. 3.7) jak w przypadku składników oporu całkowitego (rozdz. 6).

8.2. Modele aproksymacji naporu T i momentu Q na śrubie napędowej

Do aproksymacji naporu oraz momentu obrotowego śruby napędowej, jako wartości wzorcowe tych wielkości, wykorzystano obliczenia według zależności (7.1–7.3) oraz (7.4 i 7.5) –

rozdział 7.1.1 – przy założeniu, że współczynnik strumienia nadążającego w_T jest w przybliżeniu stały – niezależny od prędkości statku.

Obliczenia dokładnych wartości wykonano dla statków z bazy A (rozdz. 3.4) z uwzględnieniem podziału na typy statków. W tabeli 8.1 przedstawiono zakres badanych parametrów statków z podziałem na ich typy.

Tabela 8.1. Zakres badanych parametrów dla różnych typów statków

Typ statku	Wartość	Parametr						
		L [m]	B [m]	T [m]	C_B [–]	∇ [m ³]	V [m/s]	n_p [1/s]
Masowce	Max.	325	60	18	0,885	288000	9,5	3,33
	Min.	103	14,5	7	0,734	9770	2	0,44
Kontenerowce	Max.	374,42	56	14,5	0,787	214620	14,7	3,12
	Min.	115,5	16,5	6,5	0,640	10046	2,5	0,46
Zbiornikowce	Max.	324	60	21,5	0,884	335308	11,5	5,5
	Min.	78	9,4	4,6	0,678	3944	1,5	0,38
Statki LNG	Max.	332	55	12	0,782	170300	11,2	3,85
	Min.	95	17,5	6,1	0,682	7325	2,1	0,39

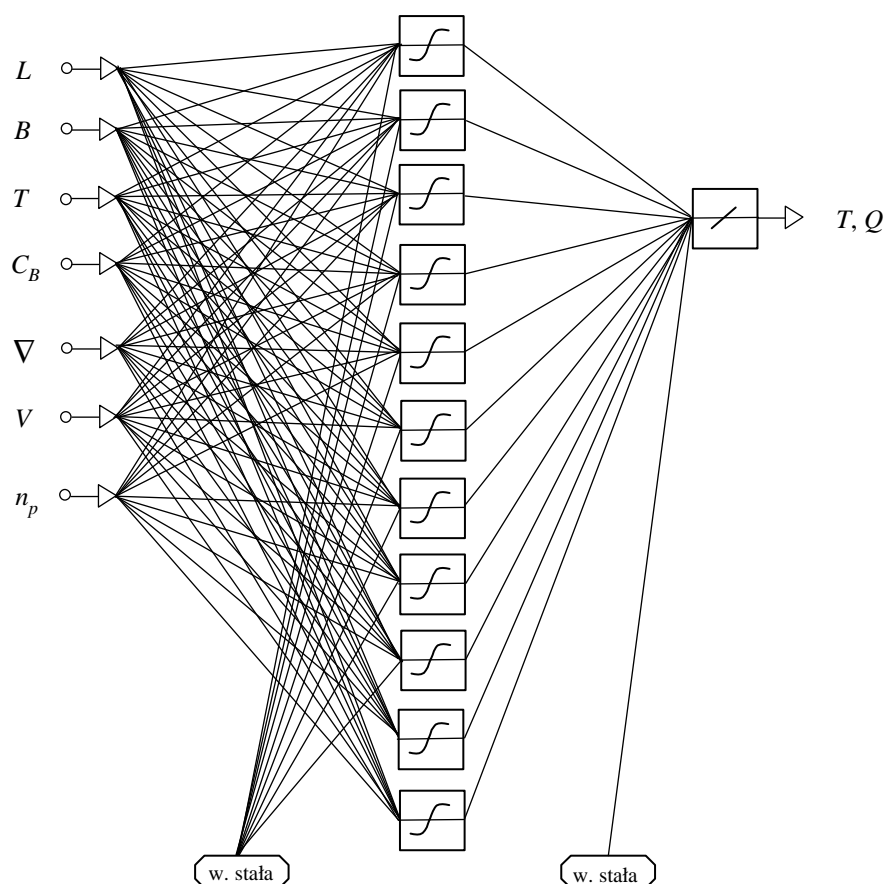
Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie wielu badań dokładności aproksymacji naporu i momentu stwierdzono, że najlepsze wyniki osiąga się przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych.

8.2.1. Hipotezy robocze dla naporu T i momentu Q

Do budowy modelu funkcji aproksymującej w pierwszym kroku określono zbiór parametrów, które w istotny sposób wpływają na zmienność naporu T oraz momentu obrotowego Q śruby napędowej – są one znane na etapie projektowania wstępnego i zostały przyjęte jako jej argumenty. Na podstawie wstępnych analiz oraz doświadczenia przy realizowaniu w rozdziale 6. aproksymacji z grupy parametrów statku, ostatecznie wybrano jako argumenty funkcji aproksymujących następujące wielkości: L , B , T , C_B , ∇ , V oraz prędkość obrotową śruby napędowej n_p .

Strukturę sztucznych sieci neuronowych oraz stosowane w nich funkcje aktywacji dla naporu T i momentu obrotowego Q wybrano ostatecznie na podstawie kompromisu między dokładnością, prostotą oraz czasem uczenia. Dla uproszczenia przyjęto dla naporu oraz momentu obrotowego taką samą strukturę ($7 \times 11 \times 1$) i parametry sieci (dane wejściowe: L , B , T , C_B , ∇ , V , n_p oraz funkcje aktywacji – sigmoidalną i liniową). Dla każdej z tych wielkości z podziałem na typy statków nauczono osobno każdą sieć neuronową. Strukturę zaprojektowanej sieci przedstawiono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Struktura zaprojektowanej sieci neuronowej
Źródło: opracowanie własne.

Ogólna postać poszukiwanej funkcji aproksymującej jest następująca:

$$T, Q = f(L, B, T, C_B, \nabla, V, n_p). \quad (8.1)$$

Z uwagi na występowanie dużych różnic w zakresach danych wejściowych oraz własności użytej funkcji aktywacji zarówno dane wejściowe, jak i wartości na wyjściu odpowiednio przeskalowano według zależności (3.4) i (3.5).

W trakcie procesu uczenia zaprojektowanej sieci neuronowej (do momentu uzyskania niezmienniej wartości błędu średniokwadratowego (zależność (3.6)) wyznaczono wartości wag dla poszczególnych połączeń neuronów oraz wartości progowe dla każdej warstwy sieci neuronowej. Opracowana funkcja aproksymacyjna dla T i Q ma następującą postać:

$$f(x_1 \cdots x_k) = \sum_{i=1}^{11} c_i \cdot \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \left(\sum_{k=1}^7 a_{i,k} x_k + b_i \right)}} - 1 \right) + D, \text{ dla } k = 7, \quad (8.2)$$

gdzie $x_k = [L, B, T, C_B, \nabla, V, n_p]$ są kolejnymi argumentami sieci neuronowej (dane wejściowe), a wartości współczynników dla każdej sieci (napór T i moment obrotowy Q) dla poszczególnych typów statków zamieszczone są w tabelach 8.2–8.9.

Tabela 8.2. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej napór śruby T dla masowców

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	-1,323	-0,033	0,461	-0,553	-1,067	-1,092E-3	-1,820	3,128	-584,788
2	1,278	0,126	-0,407	0,570	1,058	1,328E-3	1,949	-2,744	-230,137
3	17,232	-15,595	1,199	-15,519	-0,394	-9,171E-5	0,043	-10,215	-21,977
4	-10,771	3,117	-5,762	-0,661	11,067	1,208E-3	-1,083	9,107	-58,948
5	-5,777	1,788	-8,797	0,059	6,935	-1,279E-3	-0,179	4,642	-1,395
6	11,005	-3,053	5,818	0,733	-11,355	-1,200E-3	1,096	-9,300	-59,993
7	1,284	7,278	7,813	-0,433	-32,028	-4,992E-4	-0,041	-18,075	-4,547
8	-5,441	-10,262	3,827	-3,511	13,081	3,300E-4	0,088	5,268	-3,685
9	-0,849	-0,305	2,100	-0,701	-3,842	-6,562E-5	0,021	-3,540	40,213
10	-0,886	-12,840	-5,727	-1,824	47,000	-5,511E-4	-0,183	29,899	1,789
11	-41,397	-54,010	-4,315	90,146	-55,178	-3,383E-4	-0,381	-20,966	-2,921
D	363,578								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.3. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej moment obrotowy śruby Q dla masowców

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	18,450	17,469	11,030	-10,470	-40,026	-1,402E-6	0,309	-22,720	-9,813
2	89,000	-55,992	-154,217	19,378	65,400	7,236E-6	-0,832	55,516	1034,157
3	10,695	9,503	2,905	2,361	-12,511	-9,180E-5	0,636	-4,301	-0,604
4	0,009	5,800	7,059	-0,133	-29,014	7,762E-5	-0,677	-15,748	-0,599
5	5,764	6,148	6,138	-2,228	-19,374	6,829E-6	-0,753	0,228	1249,010
6	43,162	-22,046	79,506	-23,143	-57,228	-7,233E-6	0,833	-53,624	1034,130
7	-124,473	-141,662	-74,237	25,945	210,380	6,670E-6	-0,279	116,263	9,288
8	32,567	-7,003	-7,839	10,332	-2,262	6,445E-6	0,819	-17,292	114,596
9	-7,283	-2,243	1,324	14,579	-13,893	1,957E-6	-0,435	-3,858	-9,193
10	-12,495	6,130	-3,518	2,406	1,148	-6,805E-6	0,753	-1,169	1246,846
11	1,310	2,542	3,186	-0,244	-5,081	-6,058E-6	0,709	-4,372	6,197
D	107,656								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.4. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej napór śruby T dla kontenerowców

a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	13,529	-4,516	6,843	0,237	-27,768	-0,130	-0,023	-8,469	-0,468
2	-0,931	-0,547	-0,529	-0,320	1,085	0,103	-0,703	1,678	-4,066
3	94,577	130,435	69,444	80,877	-212,077	0,018	-0,072	-149,602	-42,238
4	-1,365	16,454	-4,427	10,024	-3,484	0,067	-0,244	1,462	28,274
5	1,794	2,455	0,563	1,776	-9,202	-0,172	-0,257	-2,741	0,448
6	1,035	1,233	-0,031	2,624	-3,835	0,160	-0,880	1,668	-1,599
7	1,315	-16,646	4,551	-9,957	3,637	-0,063	0,216	-1,469	28,185
8	5,683	-2,114	1,271	-1,857	-10,439	-0,145	0,545	-4,449	-1,127
9	3,330	-1,061	0,354	-1,933	-6,141	-0,129	0,375	-2,242	1,528
10	0,593	1,850	1,262	-4,594	-10,517	-0,275	1,366	-12,741	-0,806
11	-4,251	8,947	4,543	-9,830	0,169	-0,071	0,375	8,057	-2,411
D	-36,272								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.5. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej moment obrotowy śruby Q dla kontenerowców

$a_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	-73,447	-104,641	-54,421	-77,293	163,830	0,070	-1,052	125,660	1,420
2	0,817	1,319	0,564	0,128	-1,541	0,007	0,414	-1,746	-140,910
3	-1,321	9,158	0,963	-1,264	-8,848	0,058	-0,795	1,708	-4,870
4	10,949	13,000	-6,470	9,369	-13,660	-0,008	0,093	-1,993	169,158
5	-19,287	5,776	5,805	1,263	19,698	-0,052	0,242	-0,158	93,537
6	-11,112	-13,304	6,506	-9,481	14,023	0,009	-0,100	2,077	173,157
7	-0,824	-1,316	-0,555	-0,124	1,541	-0,005	-0,422	1,767	-149,449
8	17,005	23,351	-8,431	14,061	-26,124	-0,044	0,384	-4,302	4,337
9	25,653	-26,772	-13,347	13,822	10,767	0,051	-0,436	4,056	-0,320
10	-1,501	-0,452	0,108	0,391	1,010	-0,107	-0,498	1,879	1,896
11	-19,263	5,682	5,778	1,253	19,772	-0,052	0,240	-0,138	-93,564
D	9,084								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.6. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej napór śruby T dla zbiornikowców

$a_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	166,462	-99,968	30,224	-65,496	-90,734	-0,0629	1,389	-34,217	-0,391
2	16,163	-37,667	1,380	-12,962	-0,987	-0,025	1,025	0,324	-205,434
3	-3,328	-0,402	0,171	0,495	1,720	0,050	-1,503	1,368	-2,600
4	-115,214	156,332	-100,943	88,743	17,395	0,262	-1,349	10,637	-0,407
5	2,060	5,587	-1,839	-0,774	-8,130	0,049	-1,168	-1,904	96,189
6	40,678	-37,672	-11,551	-2,584	86,110	-0,102	1,883	67,624	0,392
7	10,669	-43,456	-4,514	-14,129	25,444	-0,025	1,022	16,458	205,791
8	-1,961	-5,434	1,619	0,679	8,189	-0,048	1,165	1,971	96,214
9	2,527	-1,166	-0,280	-0,392	0,103	0,002	0,556	-2,607	-108,979
10	3,285	-0,702	0,186	-0,467	-2,958	-0,155	1,389	-1,042	0,313
11	19,178	-12,900	24,708	-18,967	-13,342	-0,026	1,034	-11,218	-176,153
D	-283,115								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.7. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej moment obrotowy śruby Q dla zbiornikowców

$a_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	1,538	3,654	14,234	5,036	-14,396	0,055	-0,243	-9,631	0,456
2	-1,797	4,513	-4,820	3,007	-2,193	0,067	-1,405	0,780	7,113
3	15,241	-16,495	13,785	-9,971	-1,667	-0,072	1,737	-3,098	3,477
4	7,771	0,572	-3,901	0,536	-1,654	-0,055	1,327	-2,567	3,138
5	-0,690	-0,576	-2,604	0,070	12,964	-0,064	1,318	7,723	-93,152
6	0,194	0,219	-0,256	-0,135	0,493	0,162	-0,570	-4,595	-375,992
7	0,623	0,593	2,621	-0,025	-12,939	0,064	-1,323	-7,726	-91,952
8	-366,110	369,699	151,209	151,162	24,526	-0,102	2,014	12,568	0,759
9	21,425	1,517	-12,994	1,280	-1,617	-0,080	1,807	-6,144	-1,215
10	34,068	-5,123	9,838	6,631	-43,442	-0,054	1,361	-25,967	-1,082
11	1,930	-7,681	-2,627	-0,315	2,609	0,005	-0,294	8,049	-532,501
D	152,783								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.8. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej napór śruby T dla statków LNG

$a_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	-46,751	-12,113	19,622	8,137	11,719	-0,0677	1,514	4,887	60,326
2	5,247	4,142	-2,942	7,806	3,080	1,475	-0,723	3,521	-0,030
3	4,251	0,732	-3,0178	-2,096	5,143	-0,070	1,534	-0,1578	61,499
4	-2,142	-1,898	0,257	0,277	2,871	-0,311	-0,317	1,745	1,014
5	-1,526	3,601	11,752	0,477	-11,967	0,068	-1,474	-7,014	61,492
6	-3,125	-0,607	1,250	-1,000	4,423	0,160	-1,216	1,920	-0,781
7	-1,589	-6,775	-13,652	4,030	10,102	0,070	-1,529	10,852	58,685
8	-0,412	-0,093	4,289	1,207	1,177	0,155	-1,295	6,104	0,627
9	8,087	8,590	-0,4112	2,140	-12,938	-0,274	6,968	-4,682	0,360
10	26,781	-2,762	-28,232	-14,777	22,197	0,069	-1,525	15,697	62,338
11	-4,0256	-1,409	13,047	-0,893	0,644	0,0773	-1,810	-7,979	-1,187
D	-59,0961								

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.9. Współczynniki dla sieci według wzoru (8.2), aproksymującej moment obrotowy śruby Q dla statków LNG

$a_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	b_i	c_i
1	-4,730	11,563	14,105	-8,998	-15,321	-0,082	1,652	-6,201	-1,005
2	-3,131	-2,392	-4,456	-0,113	5,832	-0,290	-0,208	5,766	1,343
3	7,076	7,769	-5,150	0,581	-9,461	-0,050	1,248	-1,315	3,654
4	-8,867	-6,558	-7,190	-1,163	13,734	0,053	-2,673	7,362	0,310
5	-4,568	-13,312	15,674	-4,667	2,419	0,063	-1,291	-0,005	3,254
6	7,165	6,618	0,428	-0,181	-0,426	-0,033	1,378	-8,208	3,070
7	1,376	-0,014	0,635	0,116	0,232	-0,062	1,631	-0,809	0,634
8	-13,126	18,929	-12,536	-8,068	12,332	-0,033	1,151	-0,086	-10,925
9	-0,215	-2,329	0,769	-1,008	-1,302	-0,032	1,146	-4,843	9,189
10	0,288	3,242	0,579	-0,215	-0,136	-0,124	0,041	-0,141	-36,448
11	2,165	-2,233	-1,426	0,854	-3,360	0,130	-0,094	-0,687	-36,432
D	-1,326								

Źródło: opracowanie własne.

Obliczenie wartości naporu T i momentu obrotowego śruby Q z uwzględnieniem podziału na typy statków, z wykorzystaniem opracowanej sztucznej sieci neuronowej, jej struktury oraz wyznaczonych w procesie uczenia wartości współczynników (wag) przebiega następująco:

1. przeskalowanie (normalizacja) danych wejściowych $x_k = [L, B, T, C_B, \nabla, V, n_p]$ zgodnie z zależnością (3.4), dla wartości x_{max} , x_{min} z tabeli 8.1;
2. obliczenie wartości z sieci według funkcji (8.2) oraz parametrów z tabel 8.2–8.9 (w zależności od typu statku);
3. przeskalowanie uzyskanych wartości z sieci zgodnie z zależnością (3.5), gdzie y_{max} oraz y_{min} to wartości liczbowe ze zbioru uczącego (tabela 8.10) i obliczenie ostatecznych wartości naporu i momentu obrotowego śruby:

$$T, Q = \frac{(f(x_k) + 1)(y_{max} - y_{min})}{2} + y_{min} \quad (8.3)$$

Tabela 8.10. Zakres badanych parametrów (napór i moment) dla różnych typów statków

Typ statku	Wartość	Parametr	
		T [kN]	Q [kNm]
Masowce	Max.	9988,98	15999,39
	Min.	0,13	4,16
Kontenerowce	Max.	15722,78	24992,25
	Min.	0,65	7,03
Zbiornikowce	Max.	7804,24	10115,96
	Min.	0,24	0,41
Statki LNG	Max.	7146,74	8901,70
	Min.	0,07	4,52

Źródło: opracowanie własne.

8.2.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna naporu T i momentu Q na śrubie

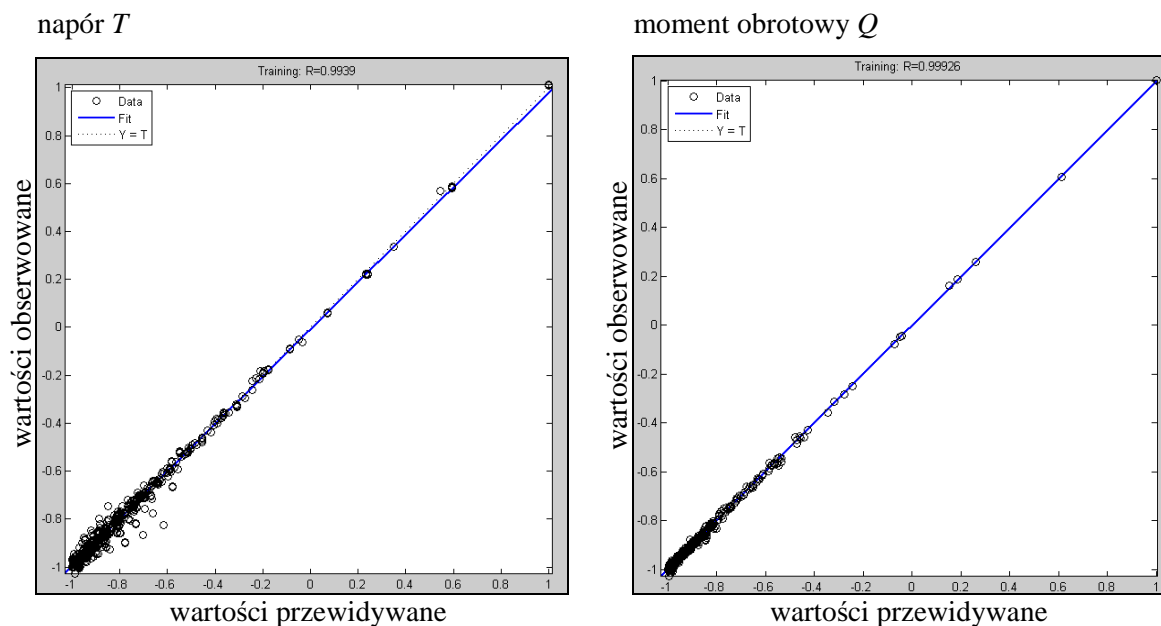
Podstawą weryfikacji statystycznej był współczynnik determinacji R^2 , wykresy rozrzutu wartości przewidywanych względem obserwowanych (wykresy rozrzutu wartości uzyskanych z aproksymacji względem wzorcowych) oraz błąd średniokwadratowy świadczący o jakości nauczonej sieci. Ocenę jakości uzyskanych aproksymacji przeprowadzono również, analizując błędy względne i bezwzględne.

W tabeli 8.11 zawarto wybrane parametry statystyczne wykorzystanych sieci neuronowych, a na rysunkach 8.2–8.5 przedstawiono rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczonej sztucznej sieci neuronowej dla poszczególnych typów statków. Natomiast na rysunkach 8.6–8.9 zamieszczono porównanie uzyskanych aproksymacji na podstawie równań (8.3) z wartościami obliczonymi przy wykorzystaniu zależności (7.1) oraz (7.4) – rozdział 7.1.1 dla statków z bazy B (statków wzorcowych).

Tabela 8.11. Wybrane parametry statystyczne wykorzystanych sieci neuronowych dla poszczególnych typów statków

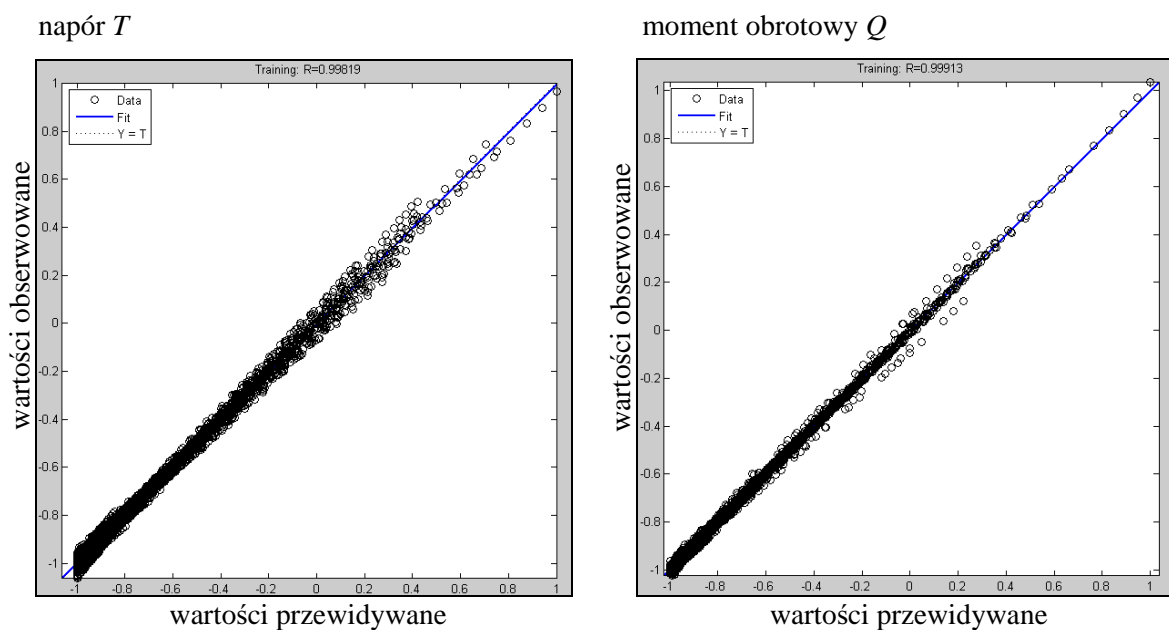
Typ	Parametr	Współczynnik korelacji R^2	Średni błąd kwadratowy
Masowce	T	0,994	0,0004
	Q	0,999	0,00002
Kontenerowce	T	0,998	0,0004
	Q	0,999	0,0002
Zbiornikowce	T	0,999	0,00008
	Q	0,999	0,00002
Statki LNG	T	0,999	0,0001
	Q	0,999	0,00008

Źródło: opracowanie własne.



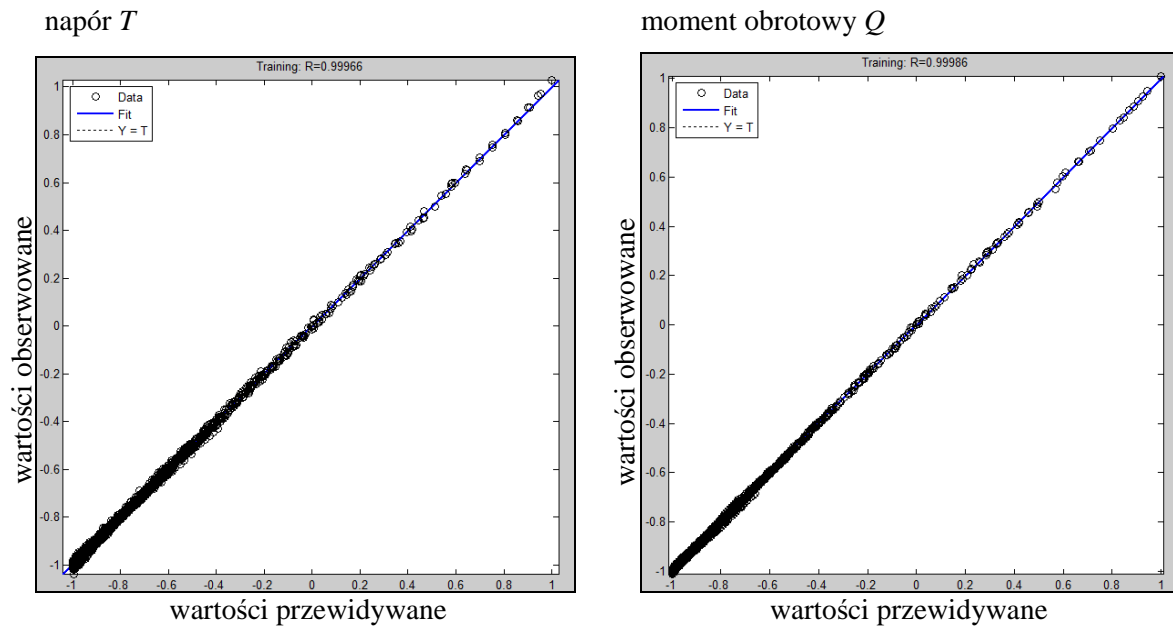
Rys. 8.2. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczonej sztucznej sieci neuronowej dla naporu i momentu obrotowego śruby dla masowców

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.



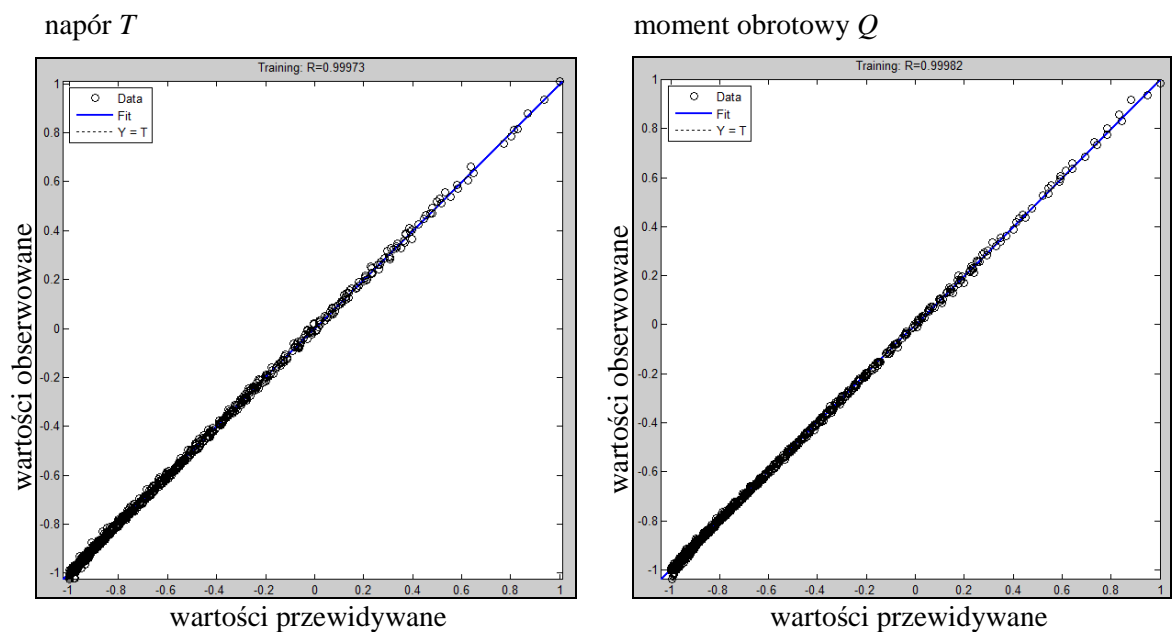
Rys. 8.3. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczonej sztucznej sieci neuronowej dla naporu i momentu obrotowego śruby dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.



Rys. 8.4. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczonej sztucznej sieci neuronowej dla naporu i momentu obrotowego śruby dla zbiornikowców

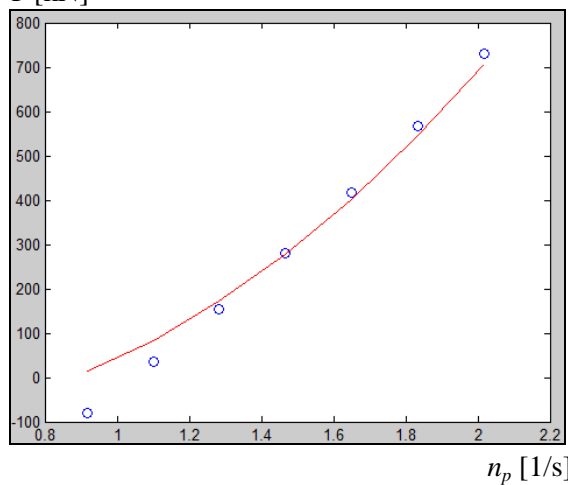
Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.



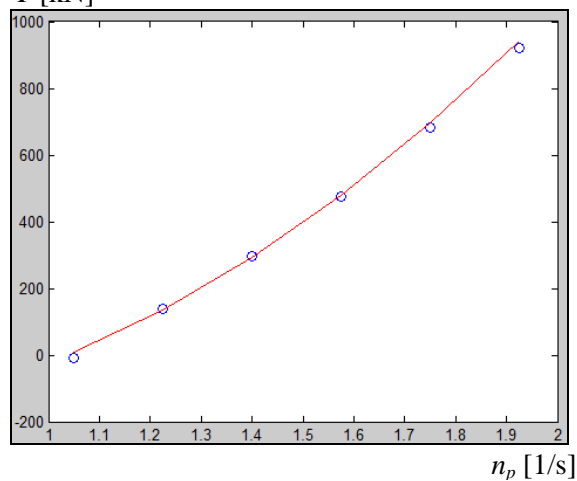
Rys. 8.5. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla nauczonej sztucznej sieci neuronowej dla naporu i momentu obrotowego śruby dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.

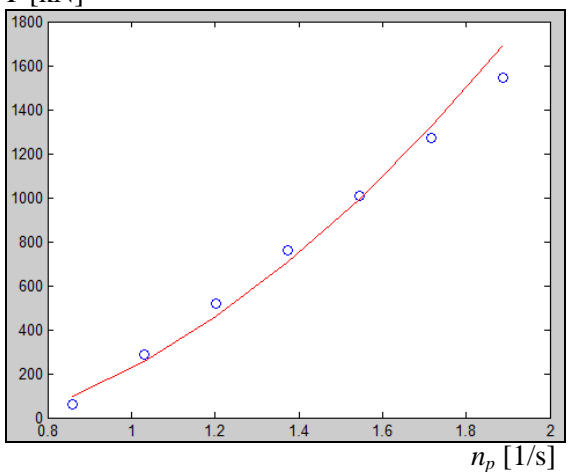
M1

 T [kN]

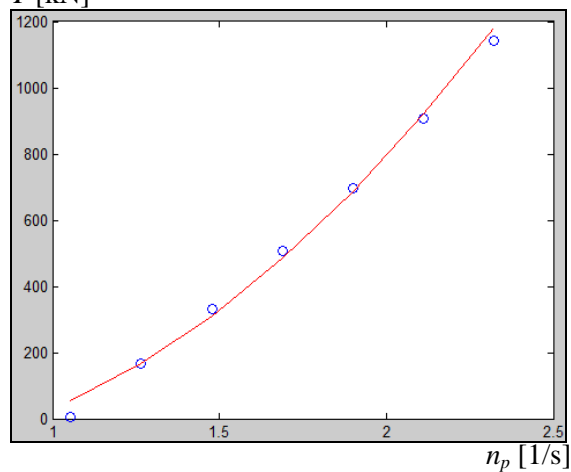
M2

 T [kN]

M3

 T [kN]

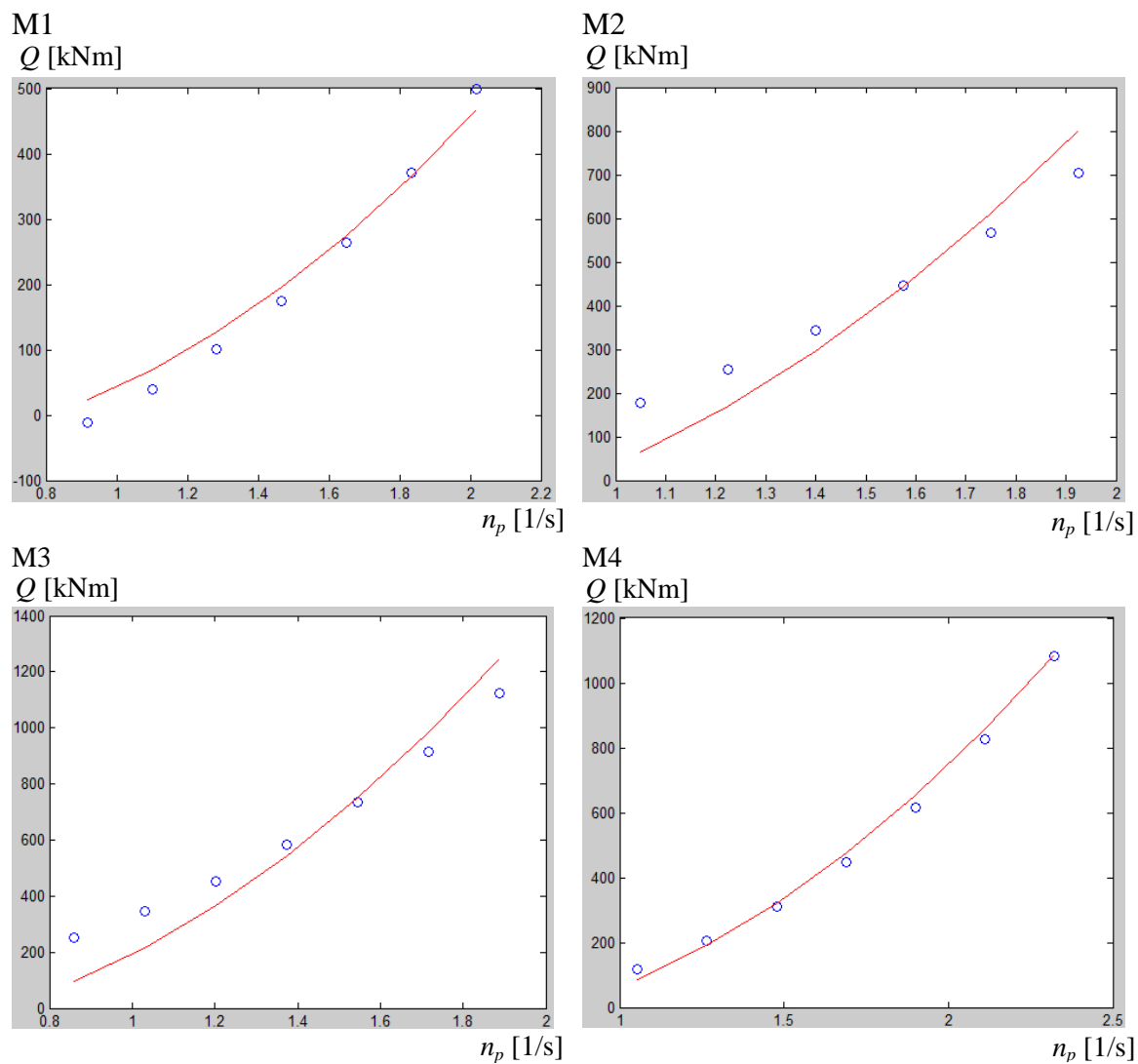
M4

 T [kN]

Objaśnienia: \circ – wyniki obliczeń według aproksymacji (8.3),
 — — wyniki obliczeń według zależności (7.1).

Rys. 8.6. Napór śruby napędowej obliczony według uzyskanych aproksymacji (8.3) oraz według zależności (7.1) dla masowców z bazy B

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.

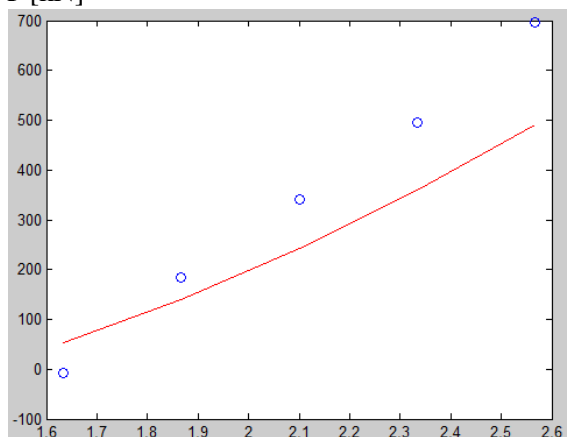


Objaśnienia jak na rysunku 8.6.

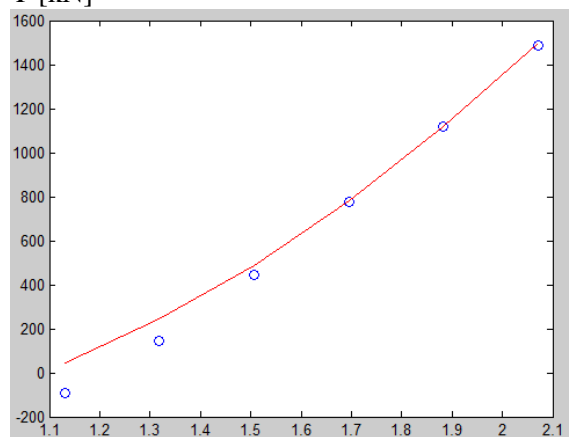
Rys. 8.7. Moment obrotowy śruby napędowej obliczony według uzyskanych aproksymacji (8.3) oraz według zależności (7.4) dla masowców z bazy B

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.

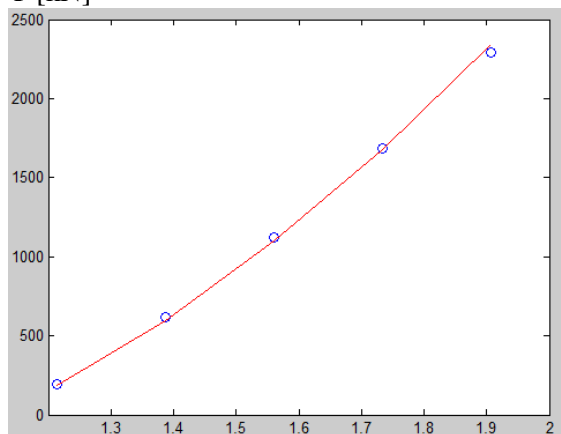
K1

 T [kN] n_p [1/s]

K2

 T [kN] n_p [1/s]

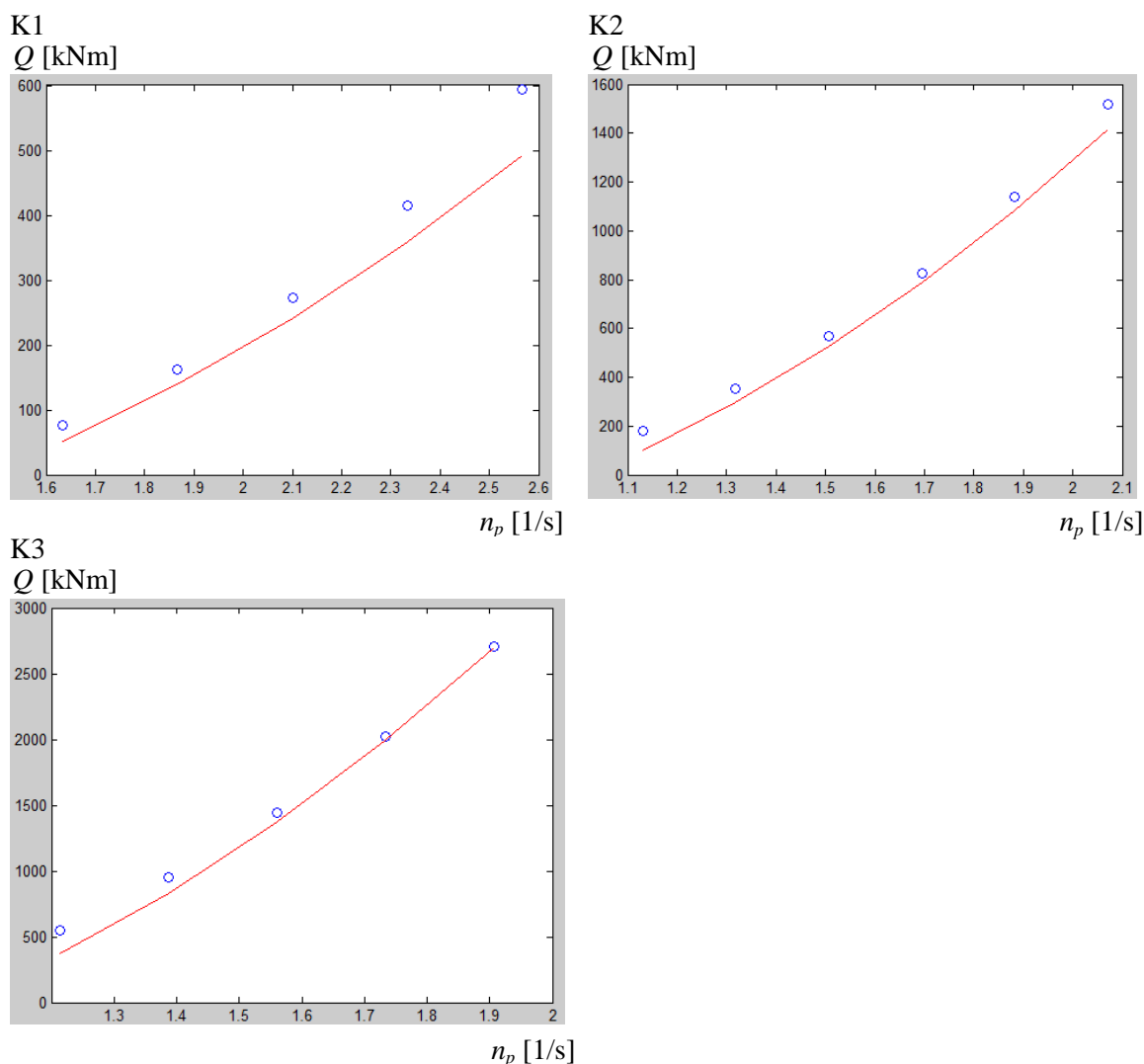
K3

 T [kN] n_p [1/s]

Objaśnienia jak na rys. 8.6.

Rys. 8.8. Napór śruby napędowej obliczony według uzyskanych aproksymacji (8.3) oraz według zależności (7.1) dla kontenerowców z bazy B

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.



Objaśnienia jak na rys. 8.6.

Rys. 8.9. Moment obrotowy śruby napędowej obliczony według uzyskanych aproksymacji (8.3) oraz według zależności (7.4) dla kontenerowców z bazy B

Źródło: opracowanie własne na podstawie własnych obliczeń w programie MATLAB.

8.3. Modele aproksymacji pola pracy silnika napędowego

Pole pracy silnika napędowego statku, jak to przedstawiono w rozdziale 7.2, definiowane jest poprzez jego charakterystyki według zależności (7.19). Dla celów oszacowania prędkości eksploatacyjnej statku i znalezienia punktu pracy silnika dla projektowanego statku konieczna jest znajomość mocy i prędkości obrotowej silnika napędowego. Wielkości te dla tego zadania można oszacować na podstawie analizy zgromadzonych danych techniczno-eksploatacyjnych zbudowanych statków (baza A).

8.3.1. Modele aproksymacji mocy silnika napędowego

8.3.1.1. Hipotezy robocze dla mocy N silnika napędowego

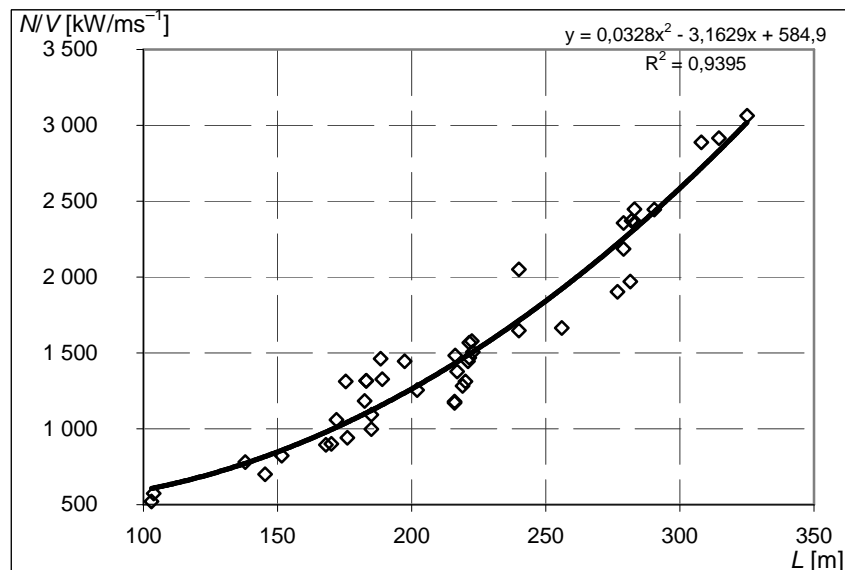
Moc N silnika napędowego dla poszczególnych typów statków aproksymowano za pomocą regresji liniowej. Analizę przeprowadzono dla zależności funkcyjnych dla jednego parametru lub ich iloczynu. W przypadku mocy silnika, modelu funkcji aproksymującej poszukiwano również dla zmiennej zależnej w postaci ilorazu mocy i prędkości statku N/V . Ze względu na to, że dla całej populacji statków zbudowanych (baza A) nie uzyskano zadowalającej dokładności ($R^2 < 70\%$), ostatecznie poszukiwania funkcji aproksymującej przeprowadzono z podziałem na typy statków.

Przykłady uzyskanych aproksymacji dla masowców przedstawiono na rysunkach 8.10–8.12, natomiast stopień dopasowania tych modeli w zależności od parametrów statku przedstawiono odpowiednio w tabeli 8.12.

Tabela 8.12. Stopień dopasowania modeli dla aproksymacji ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od parametrów statku

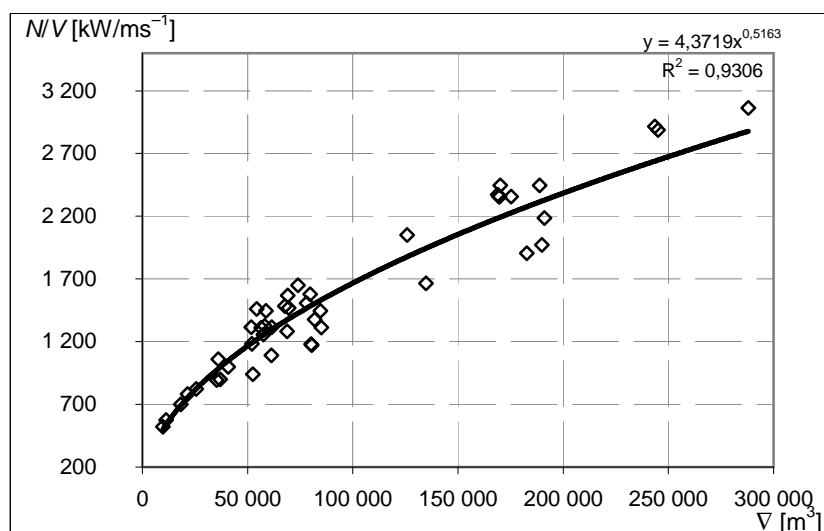
	$N/V = f(L)$	$N/V = f(DISV)$	$N/V = f(FW)$
R^2 – stopień dopasowania modelu	0,9395	0,9306	0,9464

Źródło: opracowanie własne.



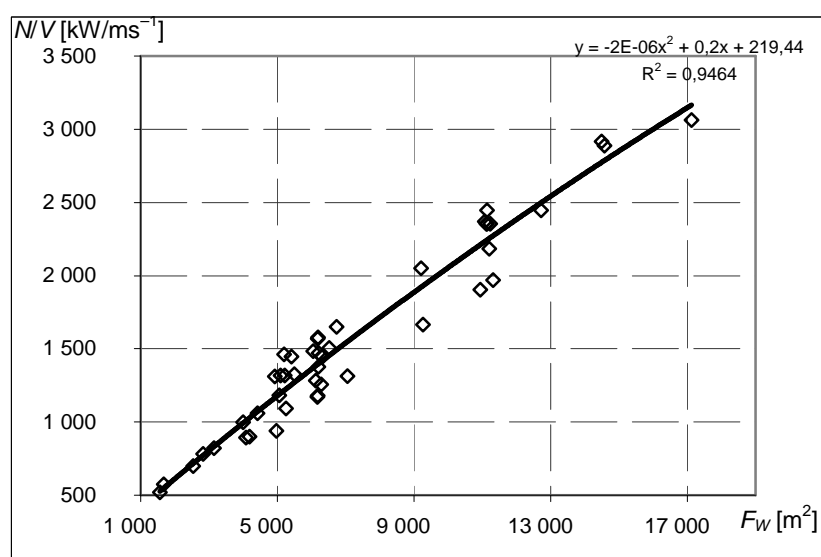
Rys. 8.10. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od długości statku między pionami L dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.11. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od wyporności statku ∇ dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.12. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od F_w ($F_w = L \cdot B \cdot C_{WP}$) dla masowców

Źródło: opracowanie własne.

Do dalszej analizy wybrano aproksymacje mocy silnika (dla zmiennej pomocniczej N/V) w funkcji wielkości F_w , dla której uzyskano najlepszy stopień dopasowania.

W analogiczny sposób, jak dla masowców, przeprowadzono analizę oraz wybrano funkcje aproksymujące moc silnika dla różnych typów statków.

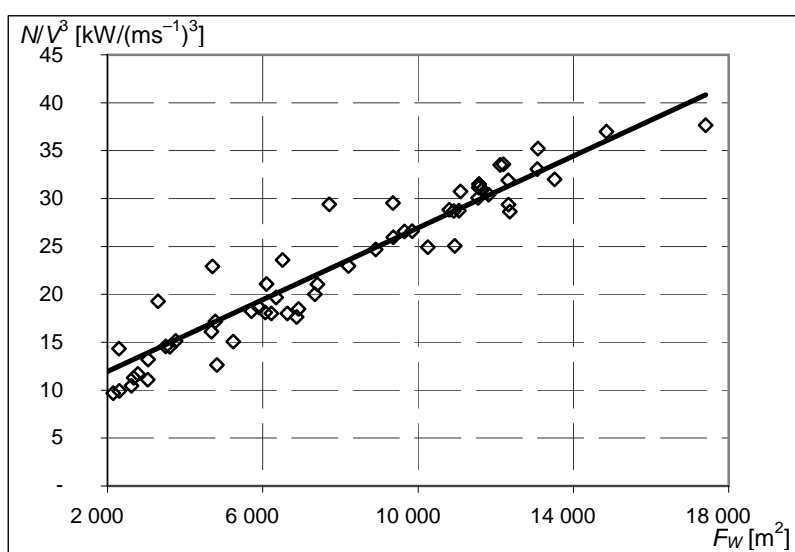
W tabeli 8.13 przedstawiono postać funkcji aproksymującej moc silnika N dla przyjętego modelu (jak w przypadku masowców – zależność w funkcji F_w), ich stopień dopasowania. Na rysunkach 8.13–8.15, w sposób graficzny, przedstawiono dokładność uzyskanych aproksymacji.

Tabela 8.13. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji mocy silnika napędowego N dla różnych typów statków

Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$N = (-2 \cdot 10^{-6} \cdot F_W^2 + 0,2 \cdot F_W + 219,44) \cdot V$	0,9464
Kontenerowce	$N = (0,001875 \cdot F_W + 8,186801) \cdot V^3$	0,8737
Zbiornikowce	$N = (7 \cdot 10^{-7} \cdot F_W^2 + 0,1737 \cdot F_W + 321,58) \cdot V$	0,9634
Statki LNG	$N = (-3 \cdot 10^{-5} \cdot F_W^2 + 0,6434 \cdot F_W - 366,49) \cdot V$	0,5926*

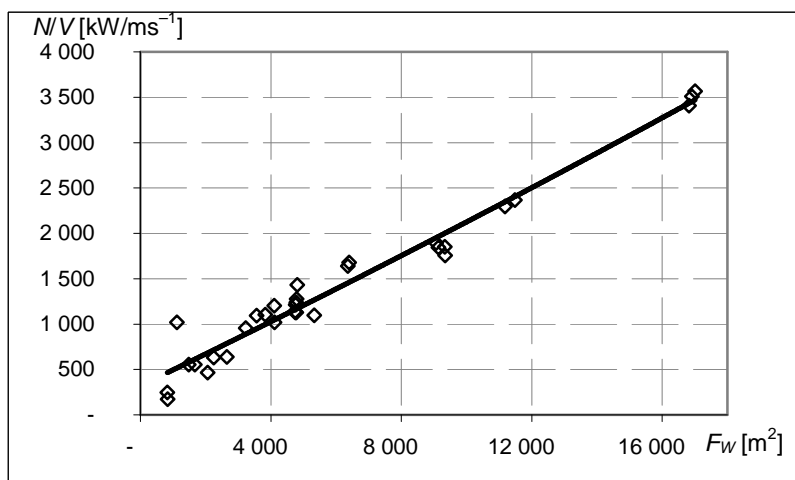
* Baza A zawiera tylko 13 statków LNG o bardzo zróżnicowanych parametrach projektowych stąd taki mały stopień dopasowania w stosunku do innych typów statków.

Źródło: opracowanie własne.



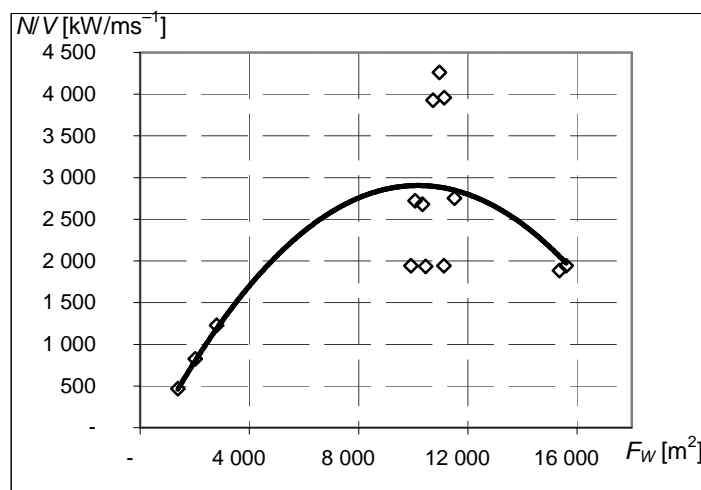
Rys. 8.13. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od F_W dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.14. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od F_W dla zbiornikowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.15. Aproksymacja ilorazu mocy silnika i prędkości statku N/V w zależności od F_w dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne.

8.3.1.2. Weryfikacja merytoryczna dla mocy N silnika napędowego

Uzyskaną wartość mocy, oszacowaną według zależności zamieszczonych w tabeli 8.13, porównano z mocą z dokumentacji statków wzorcowych (baza B). W tabeli 8.14 przedstawiono przykładowe wyniki tych porównań i obliczoną dokładność (błąd względny) uzyskanych aproksymacji.

Tabela 8.14. Dokładność obliczonej mocy N silnika napędowego dla statków wzorcowych

Statek	Moc N [kW] według dokumentacji	Moc N [kW] według aproksymacji (tabela 8.13)	Błąd względny [%]
M1	5720	5665	1,0
M2	7500	7467	0,4
M3	11400	10153	10,9
M4	12720	11550	9,2
K1	6930	7745	*11,8
K2	13320	13314	3,2
K3	26270	27234	3,7

* Duży błąd względny w obliczeniach mocy silnika napędowego z uzyskanej zależności aproksymacyjnej wystąpił jedynie dla kontenerowca K1. Wynika to z faktu, że parametry silnika napędowego tego statku znacznie odbiegają od tendencji dla innych statków z baz A i B (łącznie 63 statki).

Źródło: opracowanie własne.

8.3.2. Modele aproksymacji prędkości obrotowej n_s silnika napędowego

8.3.2.1. Hipotezy robocze dla prędkości obrotowej n_s

Poszukiwanie funkcji aproksymacyjnej dla prędkości obrotowej silnika napędowego n_s przeprowadzono dla zależności względem długości statku L , wyporności ∇ , zanurzenia T oraz

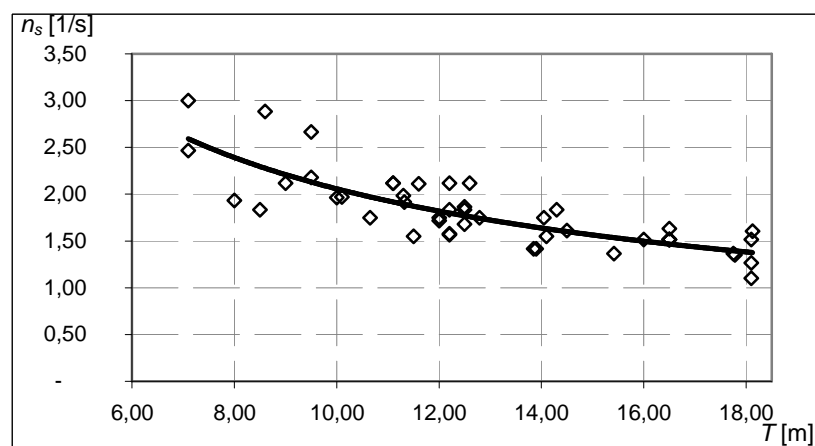
iloczynu $L \cdot B \cdot C_{WP}$. Najlepsze efekty uzyskano dla zależności prędkości obrotowej silnika w funkcji zanurzenia statku, czyli $n_s = f(T)$.

W tabeli 8.15 przedstawiono postać funkcji aproksymującej prędkość obrotową silnika n_s dla przyjętego modelu ($n_s = f(T)$) oraz ich stopień dopasowania. Natomiast na rysunkach 8.16–8.19, w sposób graficzny, przedstawiono dokładność uzyskanych aproksymacji.

Tabela 8.15. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji prędkości obrotowej silnika n dla różnych typów statków

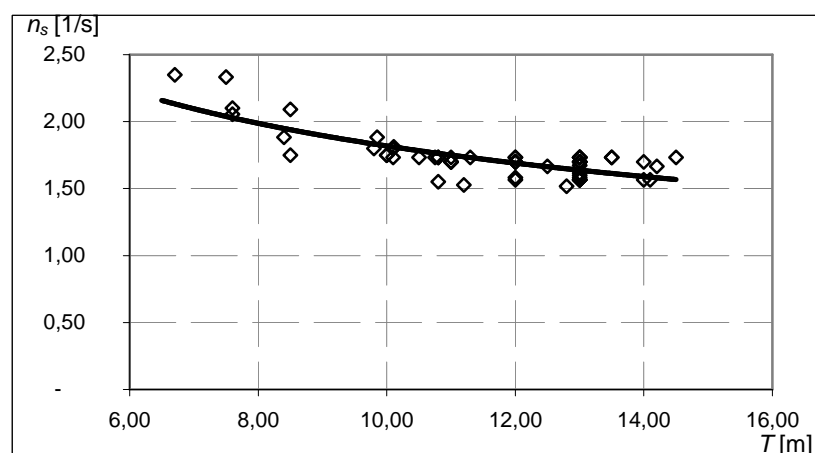
Typ	Funkcja	R^2 – stopień dopasowania modelu
Masowce	$n_s = 9,7516 \cdot T^{-0,6757}$	0,685
Kontenerowce	$n_s = 4,5526 \cdot T^{-0,3986}$	0,638
Zbiornikowce	$n_s = 11,9336 \cdot T^{-0,7381}$	0,748
Statki LNG	$n_s = 24,4738 \cdot T^{-1,1397}$	0,800

Źródło: opracowanie własne.



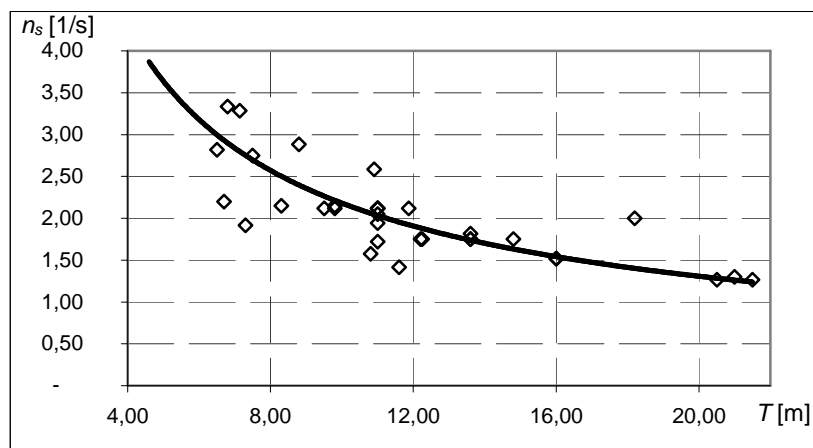
Rys. 8.16. Aproksymacja prędkości obrotowej silnika n_s w zależności od zanurzenia T dla masowców

Źródło: opracowanie własne.



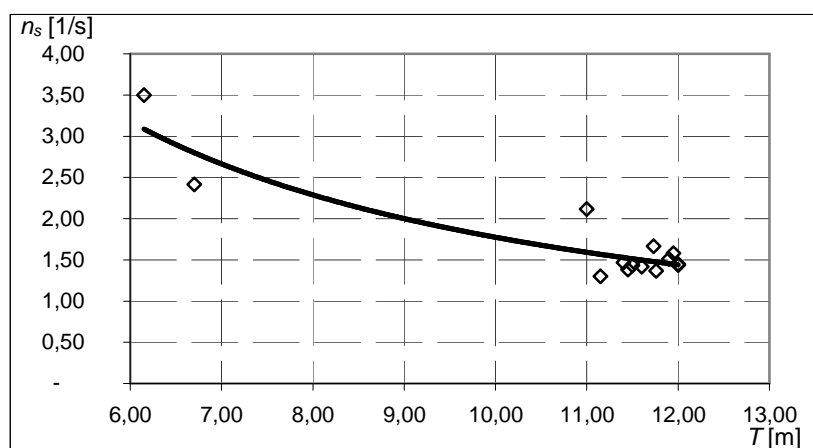
Rys. 8.17. Aproksymacja prędkości obrotowej silnika n_s w zależności od zanurzenia T dla kontenerowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.18. Aproksymacja prędkości obrotowej silnika n_s w zależności od zanurzenia T dla zbiornikowców

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8.19. Aproksymacja prędkości obrotowej silnika n_s w zależności od zanurzenia T dla statków LNG

Źródło: opracowanie własne.

8.3.2.2. Weryfikacja merytoryczna dla prędkości obrotowej n_s

Uzyskaną wartość prędkości obrotowej n_s , oszacowaną według zależności zamieszczonych w tabeli 8.15, porównano z prędkością obrotową silnika z dokumentacji statków wzorcowych (baza B). W tabeli 8.16 przedstawiono przykładowe wyniki tych porównań i obliczoną dokładność (błąd względny) uzyskanych aproksymacji.

Tabela 8.16. Dokładność obliczonych prędkości obrotowej n_s silnika napędowego dla statków wzorcowych

Statek	Prędkość obrotowa n_s [1/s] według dokumentacji	Prędkość obrotowa n_s [1/s] według aproksymacji (tabela 8.15)	Błąd względny [%]
M1	2,12	2,30	8,5
M2	1,75	1,97	12,7
M3	1,72	1,82	6,0
M4	2,11	1,86	11,8
K1	2,33	1,96	15,9
K2	1,88	1,83	2,9
K3	1,73	1,78	2,87

Źródło: opracowanie własne.

8.4. Aproksymacje współczynników do sprawności napędowej

8.4.1. Hipotezy robocze dla współczynników t , w_T , η_{RT}

Wartość współczynnika ssania t , współczynnika strumienia nadążającego w_T oraz „sprawności” rotacyjnej η_{RT} , dla wszystkich statków z bazy A z uwzględnieniem ich typów, obliczono, wykorzystując zależności z metody Holtropa-Mennena [36, 37]. Ponieważ w metodzie tej użyte są parametry statku, które nie są znane na etapie projektowania wstępnego, wartości obliczone przy jej użyciu zostały przyjęte jako wielkości wzorcowe dla poszukiwanych aproksymacji.

Poszukując odpowiednich funkcji aproksymujących współczynnik ssania t , współczynnik strumienia nadążającego w_T oraz „sprawność” rotacyjną η_{RT} posłużono się regresją wieloraką, a argumenty tych funkcji przyjęto na podstawie parametrów stosowanych w metodzie Holtropa-Mennena oraz doświadczenia przy wcześniej omawianych aproksymacjach.

W tabelach 8.17–8.19 przedstawiono uzyskane w trakcie analiz funkcje aproksymacyjne dla współczynnika ssania, „sprawności” rotacyjnej i współczynnika strumienia nadążającego, z uwzględnieniem podziału na typy statków oraz wartość współczynnika R^2 i standardowego błędu estymacji.

Tabela 8.17. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji współczynnika ssania t dla różnych typów statków

Typ	Postać funkcji	R^2 – stopień dopasowania modelu	Błąd stand. estymacji
Masowce	$t = 0,067036 + 0,059741 \cdot C_P + 0,585806 \cdot \frac{B}{L}$	0,881	0,0044
Kontenerowce	$t = 0,122934 + 0,451801 \cdot \frac{B}{L} + 0,000023 \cdot T \cdot B$	0,911	0,0024
Zbiornikowce	$t = 0,057532 + 0,000104 \cdot L - 0,004791 \cdot T +$ $+ 0,137423 \cdot C_P + 0,568628 \cdot \frac{B}{L} + 0,000071 \cdot T \cdot B$	0,870	0,0059
Statki LNG	$t = 0,051922 + 0,08754 \cdot C_P + 0,548586 \cdot \frac{B}{L}$	0,721	0,0055

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.18. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji współczynnika strumienia nadążającego w_T dla różnych typów statków

Typ	Postać funkcji	R^2 – stopień dopasowania modelu	Błąd stand. estymacji
Masowce	$w_T = -1,11851 + 0,00369 \cdot B + 2,0656 \cdot C_P +$ $-0,364233 \cdot \frac{T}{B} - 7,6 \cdot 10^{-7} \cdot \nabla$	0,947	0,0131
Kontenerowce	$w_T = -0,4612 - 0,000455 \cdot L + 0,005854 \cdot B +$ $-0,01067 \cdot T + 1,1745 \cdot C_P$	0,967	0,0086
Zbiornikowce	$w_T = -0,75793 - 0,000283 \cdot L + 1,7605 \cdot C_P - 0,34667 \cdot \frac{T}{B}$	0,938	0,0211
Statki LNG	$w_T = -0,69819 + 0,002841 \cdot B + 1,31455 \cdot C_P +$ $-0,011236 \cdot T + 0,785 \cdot \frac{B}{L}$	0,977	0,0093

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8.19. Postacie funkcji oraz stopień dopasowania modeli dla aproksymacji „sprawności” rotacyjnej η_{RT} dla różnych typów statków

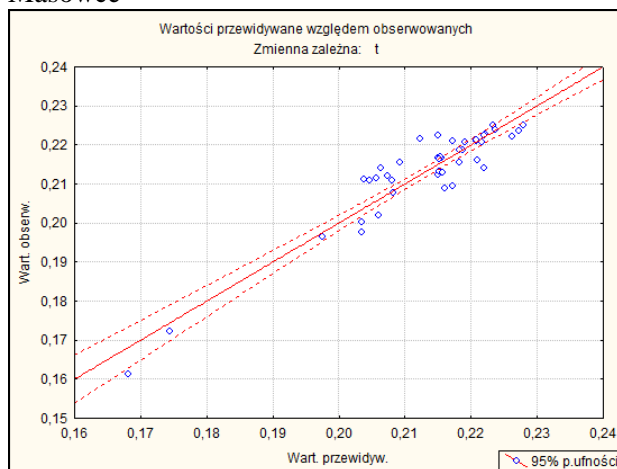
Typ	Postać funkcji	R^2 – stopień dopasowania modelu	Błąd stand. estymacji
Masowce	$\eta_{RT} = 0,99660 + 0,094350 \cdot C_P - 0,000012 \cdot T \cdot B +$ $+0,021510 \cdot \frac{B}{L}$	0,876	0,0012
Kontenerowce	$\eta_{RT} = 0,972764 - 0,000139 \cdot L + 0,081712 \cdot C_P$	0,908	0,0026
Zbiornikowce	$\eta_{RT} = 0,967752 + 0,000041 \cdot L + 0,000041 \cdot B +$ $+0,001262 \cdot T + 0,068010 \cdot C_P + 0,000009 \cdot T \cdot B +$ $-0,019171 \cdot \frac{B}{L}$	0,862	0,0015
Statki LNG	$\eta_{RT} = 0,721838 + 0,003366 \cdot B + 0,369225 \cdot C_P +$ $-0,00090 \cdot T \cdot B$	0,577	0,0035

Źródło: opracowanie własne.

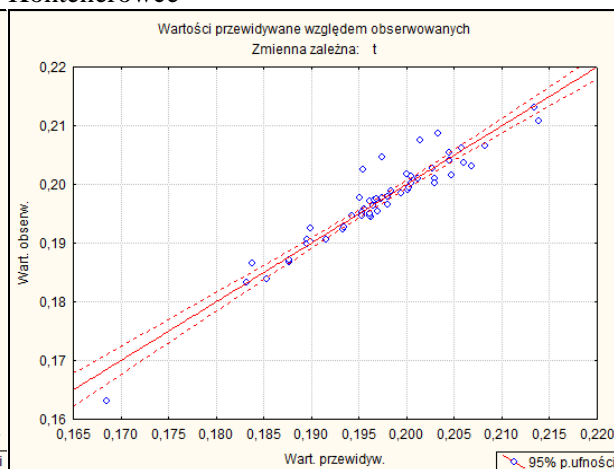
8.4.2. Weryfikacja statystyczna i merytoryczna dla współczynników t , w_T , η_{RT}

Na rysunkach 8.20–8.22 przedstawiono rozkłady wartości przewidywanych współczynnika ssania t , współczynnika strumienia nadążającego w_T oraz „sprawności” rotacyjnej η_{RT} (uzyskanych z aproksymacji – tabele 8.17–8.19) w stosunku do wartości obserwowanych (wartości obliczonych według metody Holtropa-Mennena [36–39]) dla poszczególnych typów statków.

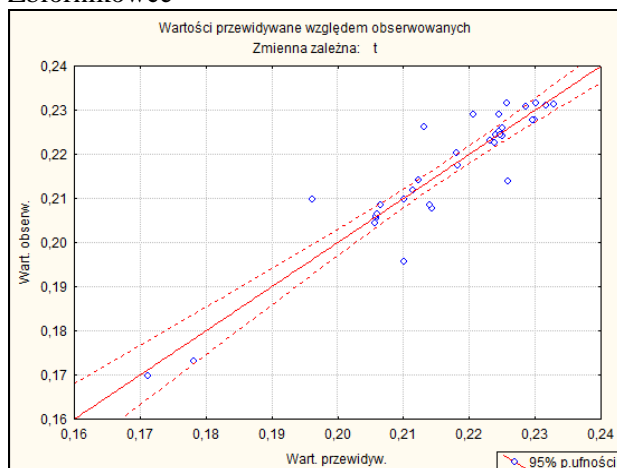
Masowce



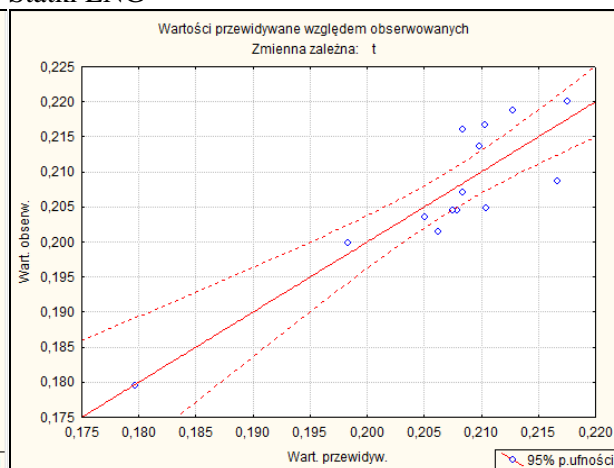
Kontenerowce



Zbiornikowce



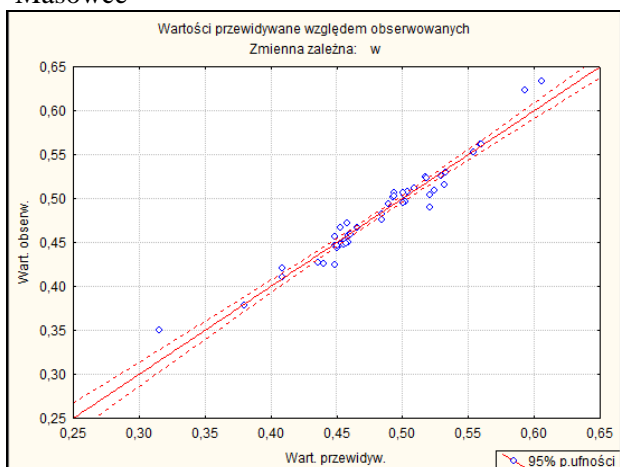
Statki LNG



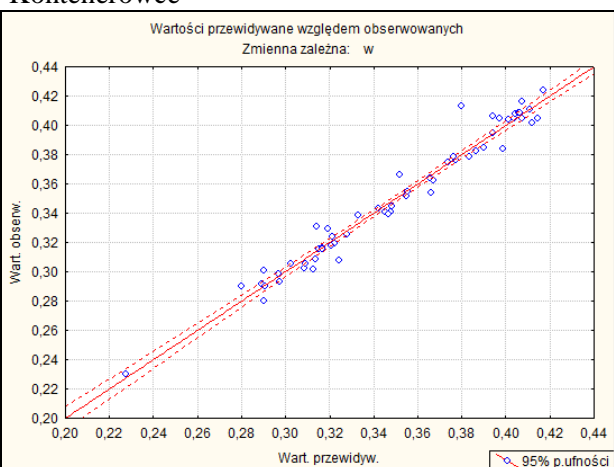
Rys. 8.20. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla modelu funkcji aproksymującej współczynnik ssania t dla poszczególnych typów statków

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

Masowce



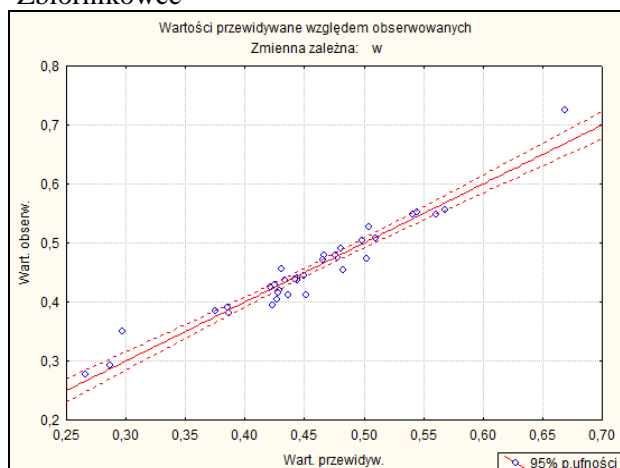
Kontenerowce



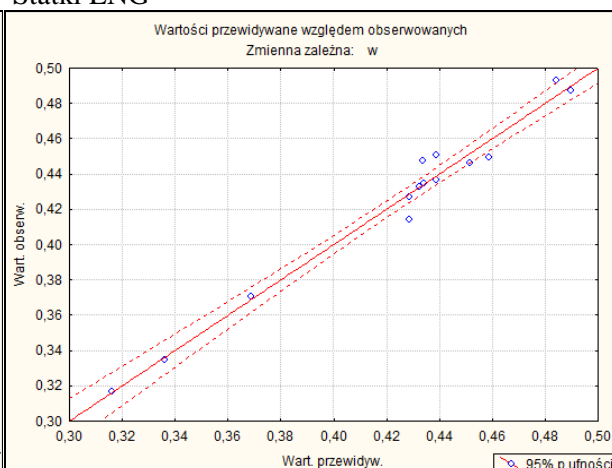
Rys. 8.21. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla modelu funkcji aproksymującej współczynnik strumienia nadążającego w_T dla poszczególnych typów statków

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

Zbiornikowce



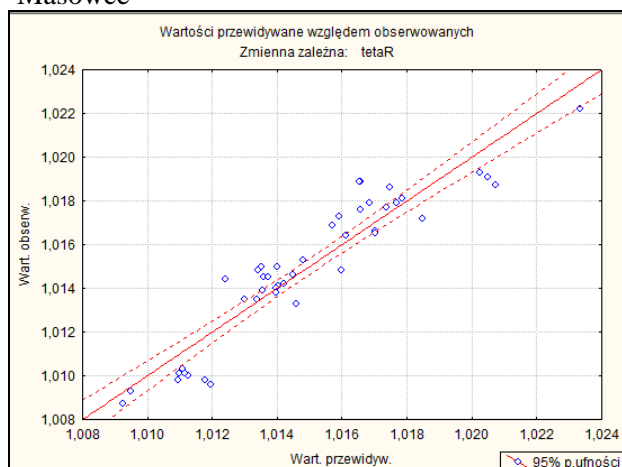
Statki LNG



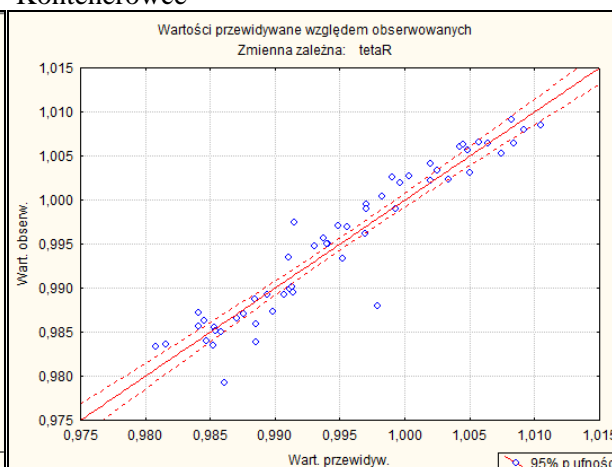
Rys. 8.21. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla modelu funkcji aproksymującej współczynnik strumienia nadążającego w_T dla poszczególnych typów statków (cd.)

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

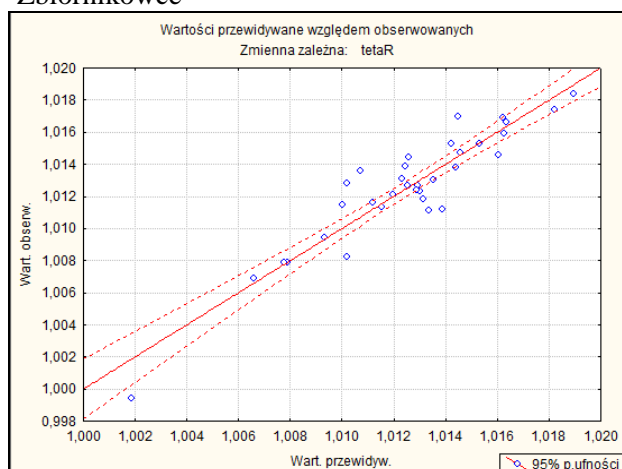
Masowce



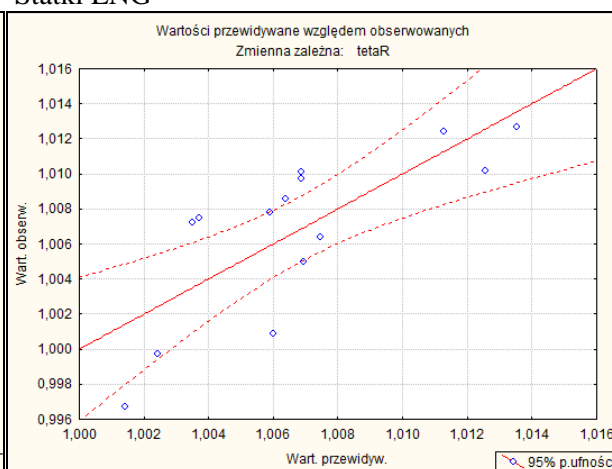
Kontenerowce



Zbiornikowce



Statki LNG



Rys. 8.22. Rozkład wartości przewidywanych względem obserwowanych dla modelu funkcji aproksymującej „sprawność” rotacyjną η_{RT} dla poszczególnych typów statków

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń własnych w programie STATISTICA.

Tabela 8.20. Dokładność obliczonych wartości współczynnika t , w_T oraz „sprawność” η_{RT} dla statków wzorcowych

Statek	t_{wz}^* [–]	t_{ap}^{**} [–]	δt^{***} [%]	w_{Twz}^* [–]	w_{Tap}^{**} [–]	δw_T^{***} [%]	η_{RTwz}^* [–]	η_{RTap}^{**} [–]	$\delta \eta_{RT}^{***}$ [%]
M1	0,2105	0,2130	–1,19	0,4544	0,4865	–7,07	1,0137	1,0742	–5,97
M2	0,1882	0,1961	–4,22	0,4070	0,4847	–19,09	1,0175	1,0737	–5,52
M3	0,2231	0,2229	0,09	0,4914	0,4928	–0,28	1,0100	1,0722	–6,16
M4	0,1903	0,1946	–2,27	0,3974	0,5067	–27,51	1,0147	1,0724	–5,68
K1	0,2033	0,1991	2,09	0,2587	0,3163	–22,25	1,0071	1,0087	–0,16
K2	0,1991	0,1951	1,99	0,3265	0,3387	–3,74	1,0131	1,0068	0,62
K3	0,1979	0,2000	–1,07	0,2904	0,3115	–7,27	1,0012	0,9985	0,27

Objaśnienia:

* wartości wzorcowe obliczone metodą Holtropa-Mennena [36–39];

** wartości z aproksymacji – tabele 8.17–8.19;

*** błąd względny.

Źródło: opracowanie własne.

8.5. Wnioski z opracowanych modeli parametrycznych układu napędowego statku

– Do aproksymacji naporu i momentu na śrubie napędowej zastosowano sztuczne sieci neuronowe – wszystkie inne metody zawiodły – w niektórych przypadkach błędy względne były po kilkadziesiąt procent. Uzyskana dokładność aproksymacji naporu i momentu za pomocą sztucznych sieci neuronowych jest, w porównaniu z innymi metodami, bardzo wysoka.

– Moc i prędkość obrotowa silnika napędowego dla punktu pracy odpowiadającego prędkości kontraktowej statku na wodzie spokojnej aproksymowano metodami regresyjnymi, uzyskując zadowalającą dokładność. Duże trudności były przy poszukiwaniu aproksymacji prędkości obrotowej silnika – na statkach instalowane są silniki napędowe o tej samej mocy a różnych prędkościach obrotowych.

– Aproksymacje współczynników t , w_T , i η_{RT} polegały na zredukowaniu wyrażenia Holtropa-Mennena o parametry statku, które nie są znane na etapie projektowania wstępnego i znalezieniu nowych postaci funkcji parametrycznych tych współczynników.

– Końcowa postać wzorów aproksymacyjnych składników układu napędowego statku, niezbędnych do określenia mocy napędu i prędkości statku w zmiennych warunkach pogodowych, jest dość złożona (głównie z powodu modeli parametrycznych naporu i momentu na śrubie napędowej), ale uzależniona tylko od małej liczby parametrów geometrycznych statku, nieprzekraczających wykazu zamieszczonego w rozdziale 3.6, znanych na etapie projektowania wstępnego.

– Z przeprowadzonych testów wynika, że opracowany model parametryczny jest wystarczająco dokładny aby mógł być wykorzystywany w projektowaniu wstępnym statku.

– Niektóre składniki tego modelu, takie jak wzory aproksymujące moc nominalną i prędkość obrotową silnika oraz jego pole pracy wraz ze wszystkimi ograniczeniami, uzależnione tylko od podstawowych wymiarów statku, są nowymi propozycjami do tej pory niestosowanymi w projektowaniu wstępnym statku.

9. REDUKCJA PRĘDKOŚCI STATKU ZE WZGLĘDU NA NIEBEZPIECZNE ZJAWISKA WYWOŁANE FALOWANIEM

9.1. Warunek redukcji prędkości statku

Podczas pływania statku po sfalowanej wodzie bezpośrednim efektem falowania są kołysania statku oraz ich pochodne: prędkości kołysań i przyspieszenia. Wtórnymi zjawiskami towarzyszącymi kołysaniom są: zalewanie pokładu, wynurzenia się śruby napędowej, uderzanie fali o dno i burty statku (sleming), pogorszenie stateczności i właściwości manewrowych, dodatkowe dynamiczne obciążenia kadłuba. Kołysania statku, jak i towarzyszące im zjawiska, zależą od parametrów kadłuba statku, parametrów falowania oraz od prędkości statku V i kierunku ruchu względem fali (kąt β_w , równanie (5.17)). Zjawiska te, szczególnie o odpowiednio dużym natężeniu, mogą być bezpośrednią przyczyną awarii lub katastrof morskich. Zmniejszenie wartości tych zjawisk, np. kołysań bocznych, jest możliwe poprzez zmianę kierunku ruchu statku względem fali (kąt β_w), redukcję prędkości V lub jednoczesną zmianę kierunku i prędkości.

Przy prognozowaniu średniej prędkości eksploatacyjnej przyjęto zasadę, że jeżeli:

$$\bar{U}_Z > \bar{U}_{Zdop}, \quad (9.1)$$

gdzie:

\bar{U}_Z – średnia statystyczna wartość zjawiska Z wywołanego falowaniem, a uznanego za niebezpieczne dla statku;

\bar{U}_{Zdop} – dopuszczalna wartość zjawiska Z wywołanego falowaniem, przy której statek może jeszcze płynąć bezpiecznie;

to wtedy nastąpi taka redukcja prędkości statku aby:

$$\bar{U}_Z \leq \bar{U}_{Zdop}. \quad (9.2)$$

Nie będzie zmieniany kurs statku względem fali (mimo że taka możliwość zawsze istnieje), ponieważ przy prognozowaniu średniej długoterminowej prędkości eksploatacyjnej założono, że statek będzie płynął zadany kurs wynikającym z linii żeglugowej.

9.2. Prognozowanie kołysań statku i towarzyszących im zjawisk

Do oceny zachowania się statku na fali i podjęcia decyzji o ewentualnej redukcji prędkości brane będą pod uwagę:

- kołysania boczne,
- kiwania,
- przyspieszenia pionowe,
- przyspieszenia poziome poprzeczne,

- zalewanie pokładu,
- sleming,
- wynurzanie się śruby napędowej.

Wymienione zjawiska są najczęściej brane pod uwagę lub zalecane do oceny właściwości morskich statku lub przy określaniu wskaźnika efektywności operacyjnej statku [28, 45, 47, 68, 71].

9.2.1. Kołysania statku na fali

Wykorzystując powszechnie stosowaną liniową teorię kołysań [18], w ramach której na fali regularnej, danej równaniem:

$$\zeta(t) = \zeta_A \cos(kx - \omega t), \quad (9.3)$$

kołysania na tej fali mają postać:

$$u = u_A \cos(-\omega_E t + \varepsilon_u), \quad (9.4)$$

to losowe kołysania statku na fali nieregularnej mogą być w prosty sposób wyznaczone na podstawie znajomości charakterystyki amplitudowej kołysań na fali regularnej i funkcji gęstości widmowej energii falowania losowego. Wariancja kołysań statku jest wtedy równa:

$$D_{uu}(\beta_W, V) = \int_0^\infty [Y_{u\zeta}(\omega_E / \beta_W, V)]^2 S_{\zeta\zeta}(\omega_E) d\omega_E, \quad (9.5)$$

gdzie:

D_{uu} – wariancja kołysania u , $u = 1, 2, \dots, 6$ (dla $u = 4$ – kołysania boczne, $u = 5$ – kiwania),

$Y_{u\zeta}$ – charakterystyka amplitudowa kołysania u na fali regularnej,

$$Y_{u\zeta} = \frac{u_A}{\zeta_A} \quad \text{dla } u = X_G, Y_G, Z_G,$$

$$Y_{u\zeta} = \frac{u_A}{\alpha_A} \quad \text{dla } u = \Phi, \Theta, \Psi,$$

$S_{\zeta\zeta}(\omega_E)$ – funkcja gęstości widmowej energii falowania losowego, której wartość zależy głównie od wysokości znaczącej fali H_S i okresu T_1 ,

β_W – kierunek fali względem statku (rys. 5.4), równanie (5.17),

ω_E – częstość spotkaniowa,

$$\omega_E = \omega - kV \cos \beta_W, \quad (9.6)$$

ω – częstość fali regularnej,

k – liczba falowa,

$$k = \frac{\omega^2}{g}. \quad (9.7)$$

Pierwiastek z wariancji D_{uu} jest średnim odchyleniem kwadratowym kołysań statku na fali nieregularnej, na podstawie którego można obliczyć statystyczną wartość kołysania losowego o założonym prawdopodobieństwie przewyższenia, np.:

$$\bar{u}_{A1/3} = 2,0\sqrt{D_{uu}}, \quad (9.8)$$

gdzie:

$u_{A1/3}$ – znacząca amplituda kołysania u (średnia wartość amplitudy kołysania u z 1/3 najwyższych wartości kołysań).

Pozostałe, wymienione zjawiska, powstające podczas pływania statku na fali, można uzależnić od kołysań statku.

9.2.2. Przyspieszenia statku na fali

Składowe przyspieszeń dowolnego punktu P, należącego do statku, w ramach liniowej teorii kołysań są równe:

$$\begin{aligned} a_{xP} &= \ddot{X}_G - y_P \ddot{\Psi} + z_P \ddot{\Theta}, \\ a_{yP} &= \ddot{Y}_G - z_P \ddot{\Phi} + x_P \ddot{\Psi}, \\ a_{zP} &= \ddot{Z}_G + y_P \ddot{\Phi} - x_P \ddot{\Theta}, \end{aligned} \quad (9.9)$$

gdzie:

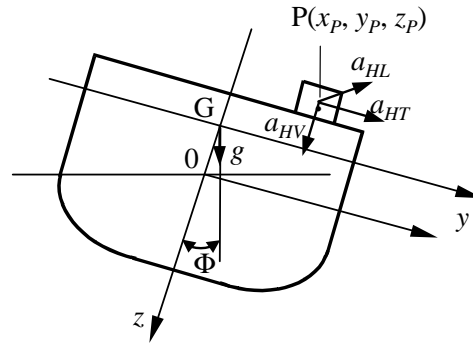
a_{xP} – przyspieszenie poziome wzdłużne,
 a_{yP} – przyspieszenie poziome poprzeczne,
 a_{zP} – przyspieszenie pionowe,
 $\ddot{X}_G, \ddot{Y}_G, \ddot{Z}_G, \ddot{\Phi}, \ddot{\Theta}, \ddot{\Psi}$ – przyspieszenia od kołysań, odpowiednio: kołysań wzdłużnych, burtowych, nurzań, kołysań bocznych, kiwań i myszkowania,
 x_P, y_P, z_P – współrzędne punktu P (rys. 9.1) w układzie związanym ze środkiem masy statku – $Gxyz$.

Ponieważ przyspieszenia od kołysań statku są równe:

$$\ddot{u} = -u_A \omega_E^2 \cos(-\omega_E t + \varepsilon_u) = -\omega_E^2 \cdot Y_{u\zeta} \cdot \zeta(t), \quad (9.10)$$

to charakterystyki amplitudowe współczynników sił masowych (ich zwrot jest zgodny ze zwrotem siły masowej) są następujące:

$$\begin{aligned} Y_{AHL}(i\omega_E) &= \omega_E^2 \left[Y_{x\zeta}(i\omega_E) + \left(z_P k - \frac{\omega^2}{\omega_E^2} \right) Y_{\Theta\alpha}(i\omega_E) - y_P k Y_{\Psi\alpha}(i\omega_E) \right], \\ Y_{AHT}(i\omega_E) &= \omega_E^2 \left[Y_{y\zeta}(i\omega_E) - \left(z_P k - \frac{\omega^2}{\omega_E^2} \right) Y_{\Phi\alpha}(i\omega_E) + x_P k Y_{\Psi\alpha}(i\omega_E) \right], \\ Y_{AV}(i\omega_E) &= \omega_E^2 [Y_{z\zeta}(i\omega_E) + y_P k Y_{\Theta\alpha}(i\omega_E) - x_P k Y_{\Phi\alpha}(i\omega_E)] + g. \end{aligned} \quad (9.11)$$

Rys. 9.1. Współczynniki sił masowych w układzie $Gxyz$

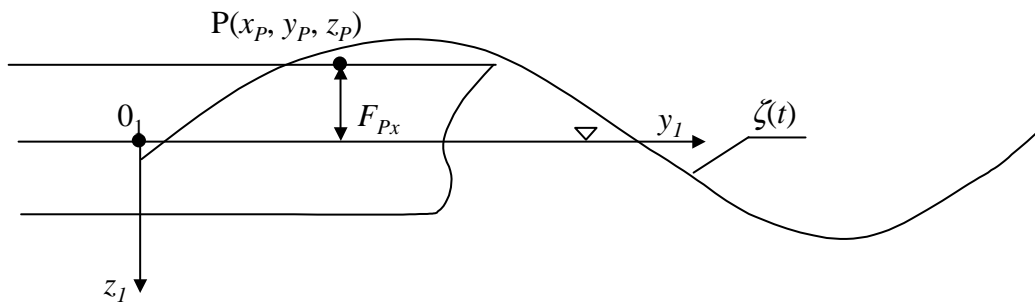
Źródło: opracowanie własne.

Charakterystyki (9.11) są w postaci zespolonej, należy więc uwzględnić jeszcze przesunięcia fazowe ε_u pomiędzy poszczególnymi kołysaniami i obliczyć rzeczywiste charakterystyki amplitudowe współczynników sił masowych na fali regularnej. Obliczając wariancje współczynników sił masowych według wzoru (9.5), określić można np. znaczące wartości tych współczynników:

$$\begin{aligned}\bar{a}_{AHL1/3} &= 2\sqrt{D_{AHL}}, \\ \bar{a}_{AHT1/3} &= 2\sqrt{D_{AHT}}, \\ \bar{a}_{AV1/3} &= 2\sqrt{D_{AV}}.\end{aligned}\tag{9.12}$$

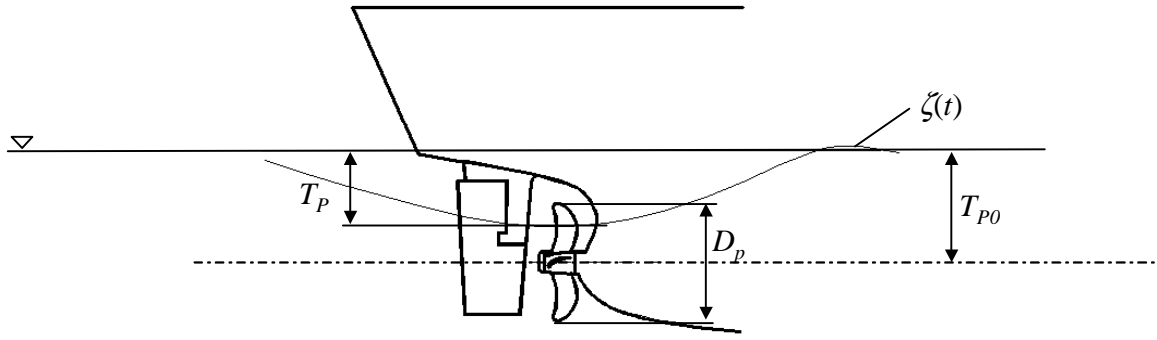
9.2.3. Ruchy względne statku na fali

Podczas kołysań statku na fali jego ruch (przesunięcie) można określić względem sfalowanej powierzchni wody. Powstający ruch względny (względne przesunięcie) ma decydujący wpływ na takie zjawiska, jak: zalewanie pokładu, wynurzanie się śruby napędowej (rys. 9.2) czy sleming (w przypadku slemingu ważna jest jeszcze względna pionowa prędkość statku (rys. 9.2) w rejonie, w którym obliczane jest prawdopodobieństwo powstania slemingu).



Rys. 9.2. Wpływ ruchu względnego na zalewanie pokładu i wynurzanie się śruby napędowej

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9.2. Wpływ ruchu względnego na zalewanie pokładu i wynurzanie się śruby napędowej (cd.)
Źródło: opracowanie własne.

Pionowe, bezwzględne przemieszczenie statku wynikające z kołysań jest równe:

$$S_{zP} = Z_G + y_P \Phi - x_P \Theta, \quad (9.13)$$

natomiast względne jest równe:

$$R_{zP} = S_{zP} - \zeta(t), \quad (9.14)$$

gdzie $\zeta(t)$ jest profilem fali danym równaniem (9.3).

Pionowa składowa bezwzględnej prędkości wchodzenia dziobu statku do wody (rys. 9.3) jest równa:

$$V_{zP} = \dot{Z}_G + y_P \dot{\Phi} - x_P \dot{\Theta} - V_G \Theta, \quad (9.15)$$

natomiast prędkość względna:

$$V_{RzP} = V_{zP} - w_z(t), \quad (9.16)$$

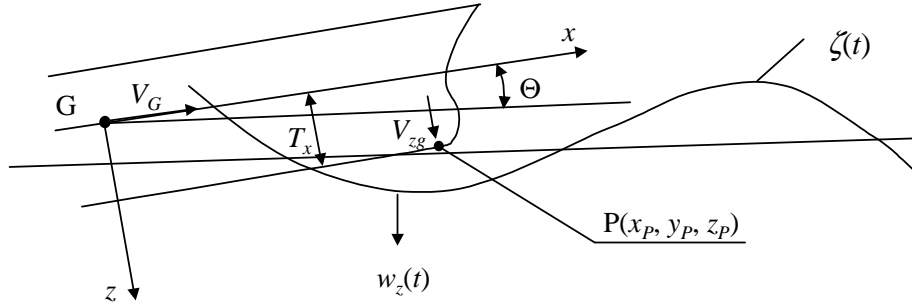
gdzie $w_z(t)$ jest pionową składową prędkości cząstki wody w ruchu falowym:

$$w_z(t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (9.17)$$

gdzie $\Phi(x, z, t)$ to potencjał prędkości w ruchu falowym.

Tak jak w przypadku przyspieszeń, na podstawie równań (9.13–9.17) oblicza się charakterystyki amplitudowe ruchów względnych i prędkości względnych, a następnie wariancje. Ponieważ zalewanie pokładu, wynurzanie się śruby czy sleming nie są zjawiskami ciągłymi, a występują tylko w określonych sytuacjach, to dla tych zjawisk oblicza się prawdopodobieństwo kiedy:

- ruch względny przekroczy wysokość wolnej burty F_{Px} (dla zalewania pokładu – rys. 9.2),
- ruch względny przekroczy głębokość położenia punktu śruby T_P (dla wynurzania się śruby – rys. 9.2),
- ruch względny przekroczy zanurzenie dziobu T_x i jednocześnie prędkość względna wchodzenia dziobu do wody V_{RzP} – rysunek 9.3 – przekroczy prędkość krytyczną $V_{kr} = 0,093\sqrt{gL}$ (dla slemingu).



Rys. 9.3. Wynurzenie się dziobu i względna prędkość wchodzenia dziobu do sfalowanej wody

Źródło: opracowanie własne.

Dla wymienionych zjawisk ilość oraz prawdopodobieństwo ich wystąpień są następujące:

– dla zalewania pokładu:

$$N_{ZP} = \frac{3600 \cdot p_{ZP}}{T_u}, \quad (9.18)$$

gdzie:

N_{ZP} – ilość zalań pokładu w ciągu godziny,

\bar{T}_u – średni okres kołysań,

p_{ZP} – prawdopodobieństwo przewyższenia wolnej burty:

$$p_{ZP} = \exp\left(-\frac{H_{EZP}^2}{2c_u D_{ZP}}\right), \quad (9.19)$$

D_{ZP} – wariancja ruchów względnych na burcie statku obliczana z liniowego modelu kołysań statku,

c_u – współczynnik poprawkowy uwzględniający niedokładności liniowego modelu kołysań statku na fali rzeczywistej określony na podstawie badań modelowych [47],

H_{EZP} – efektywna wysokość wolnej burty w miejscu, dla którego liczone jest prawdopodobieństwo zalania pokładu, uwzględniająca wysokość fali wytwarzanej ruchem statku z prędkością V ,

– dla wynurzenia się śruby wzory są takie same jak dla zalewania pokładu,

– dla slemnigu:

$$N_{SL} = \frac{3600 \cdot p_{SL}}{T_u}, \quad (9.20)$$

gdzie:

N_{SL} – ilość wynurzeń dziobu w ciągu godziny,

p_{SL} – prawdopodobieństwo wynurzenia dziobu i przekroczenia prędkości krytycznej

$$p_{SL} = \exp\left(-\frac{T_{EXSL}^2}{2c_u D_{SLW}} - \frac{V_{KRS}^2}{2c_u D_{SLP}}\right), \quad (9.21)$$

gdzie:

T_{EXSL} – efektywne zanurzenie w rejonie, dla którego liczone jest prawdopodobieństwo wynurzenia się dziobu, z uwzględnieniem wysokości fali wytwarzanej ruchem statku z prędkością V ,

D_{SLW} – wariancja ruchów względnych dziobu,

V_{KRSL} – krytyczna prędkość wchodzenia dziobu do wody, którego liczone jest prawdopodobieństwo zalania pokładu,

D_{SLP} – wariancja względnej prędkości dziobu.

Statystyczne wartości wszystkich wymienionych zjawisk, wywołanych falowaniem, zależą od parametrów fali: H_s , T_l , μ oraz od parametrów ruchu statku: V , ψ . Pomiędzy kierunkiem geograficznym fali μ a kursem statku ψ jest zależność dana równaniem (4.26), określająca kąt β_w (kierunek fali względem statku). Stąd też kołysania statku i pozostałe niebezpieczne zjawiska obliczane będą dla wszystkich statystycznych parametrów fali (H_s , T_l) występujących na danej linii żeglugowej, dla wszystkich założonych prędkości statku V oraz dla wszystkich możliwych kątów β_w wynikających z kierunków falowania i kursów statku. Wyniki obliczeń (statystyczne wartości zjawisk wywołanych falowaniem) będą porównywane z odpowiednimi kryteriami. Jeżeli w jakimś przypadku dla zadanej prędkości V nie będzie spełniony warunek (9.2), to będzie poszukiwana nowa (zmniejszona) prędkość statku, przy której warunek (9.2) będzie spełniony.

9.3. Model parametryczny właściwości morskich statku transportowego

Model parametryczny właściwości morskich najczęściej jest opracowany poprzez aproksymację:

- charakterystyk amplitudowych kołysań, przyspieszeń czy też ruchów względnych i wynikających z nich: zalewania pokładu, slemingu, wynurzania się śruby napędowej na fali regularnej;
- średnich, statystycznych wartości kołysań, przyspieszeń czy też ruchów względnych oraz częstości wystąpienia slemingu, zalewania pokładu, wynurzania się śruby napędowej na fali nieregularnej.

Postać funkcji aproksymujących właściwości morskie oraz dokładność i zakres ich stosowania były badane i przedstawione w wielu publikacjach [8, 9, 29, 46, 69, 70, 89].

Najlepsze modele parametryczne dla różnych właściwości morskich zamieszczono w publikacjach [10, 11, 13, 15]. Pełna analiza właściwości morskich jednostek pływających, ich modele parametryczne przydatne w projektowaniu wstępnym, zakres stosowania oraz osiągnięte dokładności zamieszczono w monografii [15]. Modele parametryczne z monografii [15] opracowano w oparciu na podstawowych parametrach geometrycznych statku, które wymieniono w rozdziale 3.6. Stąd też te modele wykorzystano do obliczeń wartości parametrów wybranych właściwości morskich (wymienionych w rozdziale 9.2.) i zastosowano do badania nierówności (9.1). Jeżeli ta nierówność jest spełniona, to następuje taka redukcja chwilowej

prędkości eksploatacyjnej, aby spełnić nierówność (9.2) dla właściwości morskich wymienionych w rozdziale 9.2.

9.4. Kryteria oceny właściwości morskich statku

Do badania warunku (9.2) i ewentualnie dokonania redukcji prędkości statku niezbędne są kryteria – dopuszczalne wartości zjawisk wywołanych falowaniem – przy których statek może jeszcze płynąć bezpiecznie.

Na podstawie wieloletnich obserwacji i doświadczeń określono dopuszczalne wartości kołysań statku i towarzyszących im zjawisk, powyżej których jest zagrożone bezpieczeństwo statku, załogi lub urządzeń pracujących na statku, co równa się ograniczeniu misji transportowej. Poziom dopuszczalnych wartości jest też uzależniony od typu i wielkości statku. Ze-stawienie kryteriów, proponowanych przez różnych badaczy dla wybranych właściwości morskich zamieszczono w tabeli 9.1 [45] i publikacji [47].

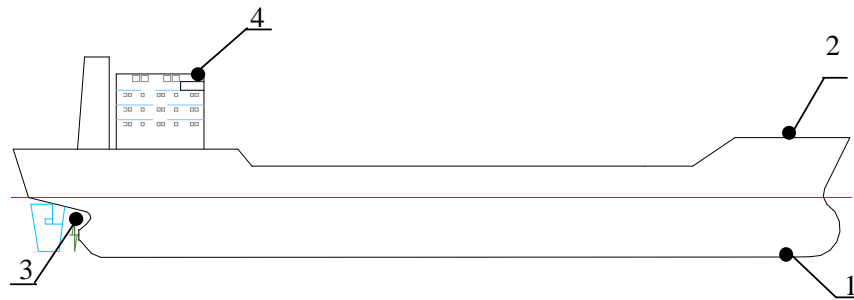
Tabela 9.1. Kryteria dla wybranych właściwości morskich

Właściwości morskie	Statki handlowe	Okręty wojenne	Szybkie małe jednostki
Przyspieszenia pionowe na dziobie (średnie odchylenie kwadratowe)	małe statki 0,275 g duże statki 0,1 g	0,275 g	0,65 g
Przyspieszenia w sterówce (średnie odchylenie kwadratowe)	0,150 g	0,20 g	0,275 g
Przyspieszenia poziome poprzeczne (średnie odchylenie kwadratowe)	0,12 g	0,10 g	0,10 g
Kołysania boczne (średnie odchylenie kwadratowe)	6,0°	4,0°	4,0°
Słeming (prawdopodobieństwo wystąpienia na 100 fal)	małe statki 0,03 duże statki 0,01	0,03	0,03
Zalewanie pokładu (prawdopodobieństwo wystąpienia na 100 fal)	0,05	0,05	0,05

Źródło: opracowanie własne na podstawie [45].

Do badania bezpieczeństwa lub efektywności statku podczas pływania po sfalowanej wodzie najczęściej stosowane jest jedno kryterium dla jednego zjawiska. Sytuacja taka jest definiowana w następujący sposób: jeżeli np. aktualne kołysania boczne są mniejsze od przyjętego kryterium, to pod względem kołysań bocznych statek płynie bezpiecznie, jeżeli natomiast są większe, to jest zagrożone bezpieczeństwo statku. Aby uniknąć tego zagrożenia lub je ograniczyć podczas pływania przy określonym stanie morza, należy zredukować prędkość, zmienić kurs statku względem fali lub wykonać oba te manewry jednocześnie.

Do oceny czy konieczna jest redukcja prędkości statku, w wyniku przekraczania dopuszczalnych kryteriów dla poszczególnych właściwości morskich, wartości odpowiednich parametrów obliczane są z monografii [15] dla wybranych punktów statku – rysunek 9.4.

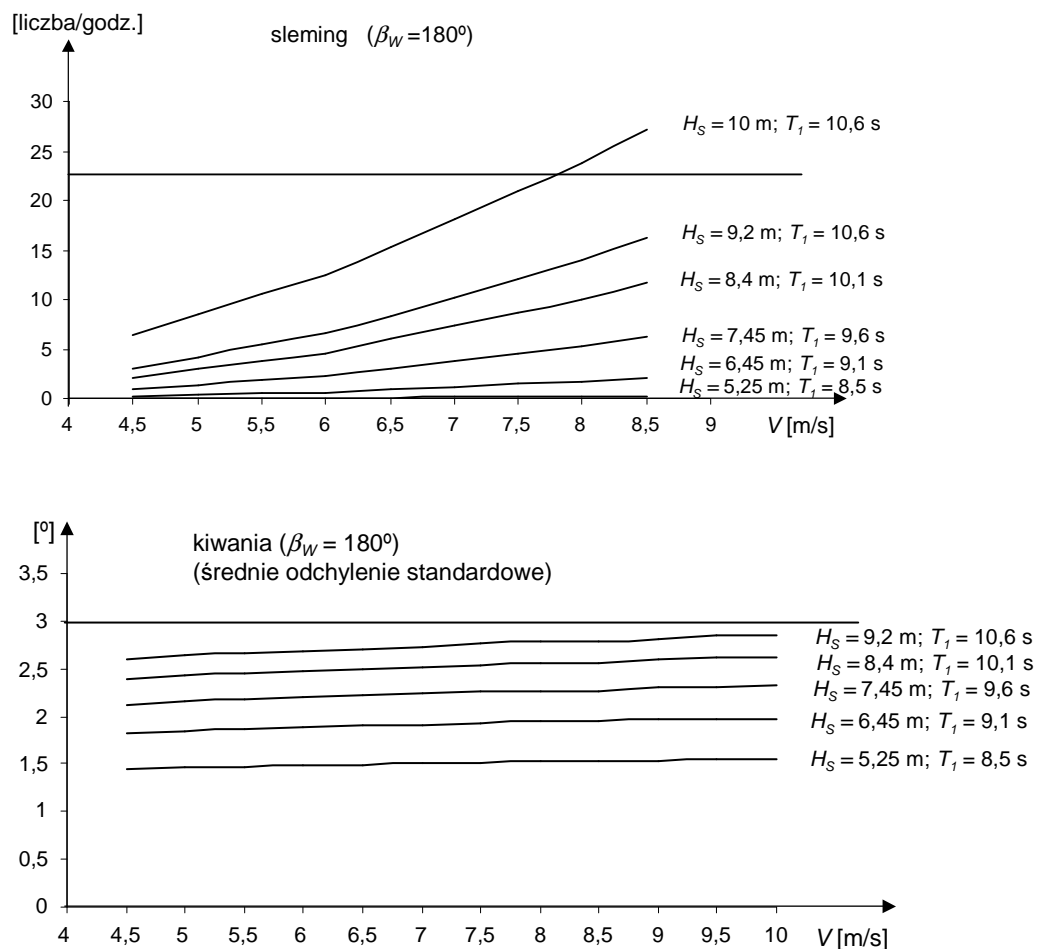


Objaśnienia: 1 – dla ślęmingu, 2 – dla zalewania pokładu i przyspieszeń na dziobie, 3 – dla wynurzania się śruby, 4 – dla przyspieszeń w sterówce.

Rys. 9.4. Punkty, dla których obliczono parametry właściwości morskich przedstawionych na rysunku 9.5 z wykorzystaniem kryteriów z tabeli 9.1

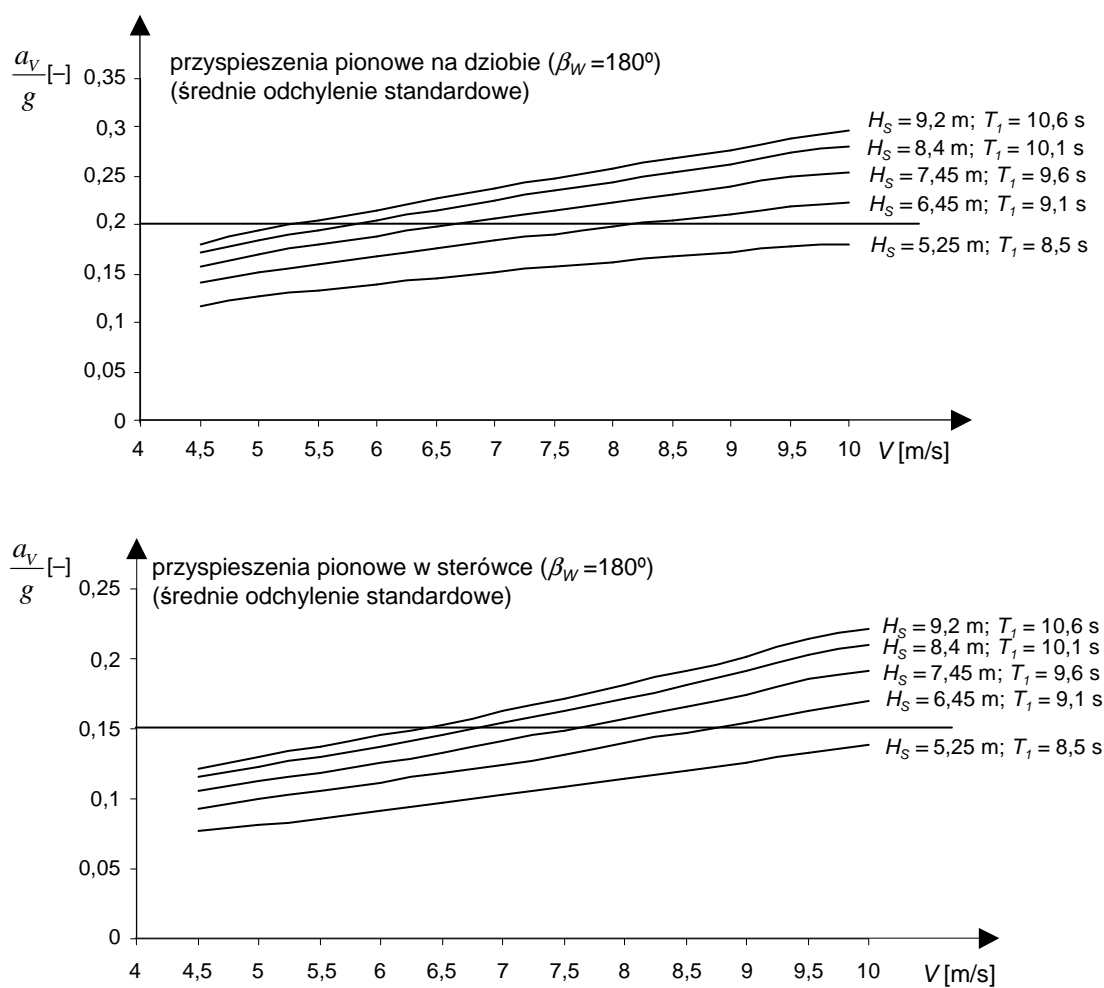
Źródło: opracowanie własne.

Wpływ prędkości statku na niektóre właściwości morskie na fali nieregularnej, z zaznaczonym dla danego zjawiska odpowiednim kryterium w postaci linii prostej, przedstawiono na rysunku 9.5.



Rys. 9.5. Wpływ prędkości statku K1 na wybrane właściwości morskie

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń według publikacji [20].



Rys. 9.5. Wpływ prędkości statku K1 na wybrane właściwości morskie (cd.)

10. METODA WYZNACZANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU TRANSPORTOWEGO PRZYDATNA W PROJEKTOWANIU WSTĘPNYM

10.1. Wstęp

Celem prowadzonych badań (rozdz. 2.3) jest opracowanie metody wyznaczania prędkości eksploatacyjnej statku transportowego w statystycznych warunkach pogodowych, jakie występują na linii żeglugowej, na której ma być eksploatowany statek. Jednocześnie opracowana metoda (model matematyczny) ma zawierać tylko podstawowe parametry statku, które znane są na etapie projektowania wstępnego. Wtedy opracowany model będzie mógł być już na etapie projektowania wstępnego zastosowany do optymalizacji wymiarów statku w celu zmaksymalizowania zysku armatora (rozdz. 1.2) przy jednoczesnym spełnieniu różnych kryteriów, np. projektowego wskaźnika efektywności energetycznej EEDI (rozdz. 1.3.2). Ponieważ warunki pogodowe (rozdz. 4), jakie występują na zadanej linii żeglugowej, są wielkościami losowymi, stąd opracowana metoda będzie musiała uwzględniać ten charakter parametrów wiatru i falowania, a obliczana prędkość statku będzie średnią statystyczną prędkością eksploatacyjną z określonym prawdopodobieństwem jej utrzymania. Poziom tego prawdopodobieństwa będzie wynikał z mocy silnika przewidywanego do napędu projektowanego statku.

Powyższe zagadnienie rozwiązano w dwóch etapach:

1. W pierwszym etapie, z opracowanych modeli parametrycznych: całkowitego oporu statku (rozdz. 6) i naporu śruby oraz mocy napędu (rozdz. 8) wyznaczono, dla zadanych parametrów wiatru, prądu i falowania, chwilową prędkość eksploatacyjną statku.

2. W drugim etapie, na podstawie rozkładu średnich statystycznych, długoterminowych (sezonowych) parametrów pogodowych (rozdz. 4) występujących na zadanej linii żeglugowej, obliczono średnią statystyczną prędkość eksploatacyjną statku transportowego.

10.2. Chwilowa prędkość eksploatacyjna statku

Podczas ruchu statku po sfalowanej wodzie na statek działają, oprócz oporu na wodzie spokojnej, dodatkowe siły oddziaływania wiatru, falowania i ewentualnie od powierzchniowych prądów morskich, jak to już przedstawiono w rozdziale 5. Te oddziaływania, oprócz dodatkowego oporu, powodują powstanie siły bocznej i momentu obracającego statek wokół osi pionowej. Siła boczna wywołuje dryf statku, a moment zmianę kursu – aby utrzymywać zadany kurs statku na danym akwenie przy działaniu zewnętrznego momentu obracającego musi być wychylana płetwa sterowa. Przy założeniu, że kurs statku ma być utrzymywany, chwilowa prędkość jest obliczana z dwóch układów równań. Rozwiązanie pierwszego układu składa się z trzech nieliniowych równań:

$$\begin{aligned}
R_{xC}(V) &= R_x(V, P_G, P_C) + R_{xA}(V, P_G, P_A) + R_{xW}(V, P_G, P_W) + R_{xR}(V, P_G, P_R), \\
R_{yC}(V) &= R_y(V, P_G, P_C, \beta) + R_{yA}(V, P_G, P_A, \beta) + R_{yW}(V, P_G, P_W, \beta) + R_{yR}(V, P_G, P_R, \beta, \delta_R), \\
M_{zC}(V) &= M_z(V, P_G, P_C, \beta) + M_{zA}(V, P_G, P_A, \beta) + M_{zW}(V, P_G, P_W, \beta) + M_{zR}(V, P_G, P_R, \beta, \delta_R), \quad (10.1)
\end{aligned}$$

gdzie:

$R_{xC}(V), R_{yC}(V), M_{zC}(V)$ – składniki oporu całkowitego i momentu obrotowego względem osi „Z” dla statku płynącego z prędkością V w rzeczywistych, chwilowych warunkach pogodowych,

R_x, R_y, M_z – składowe oporu i momentu podczas ruchu statku na wodzie spokojnej z uwzględnieniem prądu powierzchniowego,

R_{xA}, R_{yA}, M_{zA} – składowe dodatkowego oporu i momentu od wiatru,

R_{xW}, R_{yW}, M_{zW} – składowe dodatkowego oporu i momentu od falowania,

R_{xR}, R_{yR}, M_{zR} – składowe siły i momentu na sterze płetwowym,

β – kąt dryfu statku,

δ_R – kąt wychylenia steru,

P_G – parametry geometryczne statku,

P_A – parametry wiatru,

P_C – parametry prądu powierzchniowego,

P_W – parametry falowania,

P_R – parametry geometryczne steru płetwowego.

Występujące w układzie równań (10.1) poszczególne wielkości (opór na wodzie spokojnej, dodatkowy opór od prądu powierzchniowego, wiatru, falowania i od płetwy sterowej oraz odpowiednie siły boczne i momenty) opisane są modelami parametrycznymi przedstawionymi w rozdziale 6.7 dla poszczególnych typów statków:

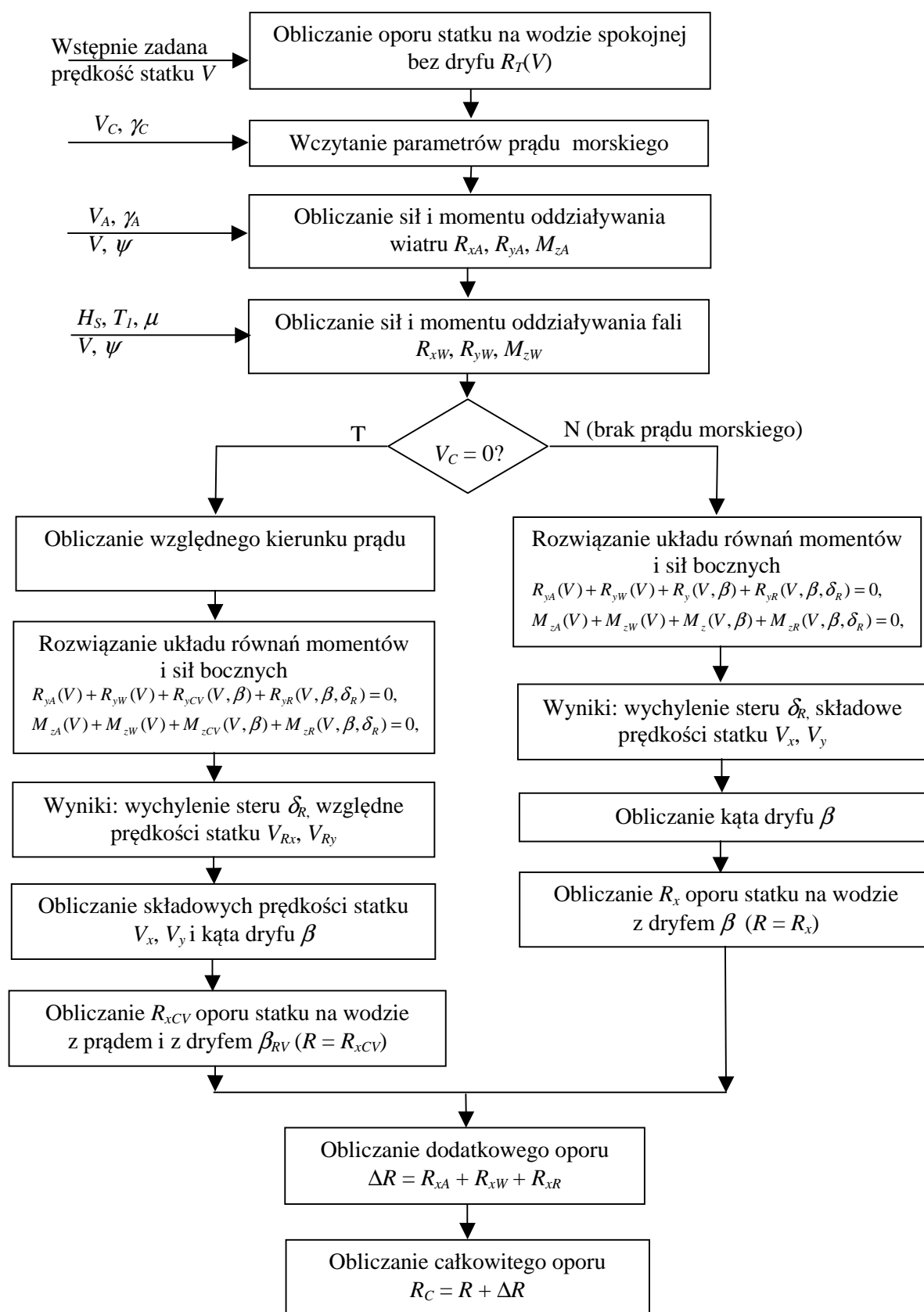
- masowce: (6.26–6.28),
- kontenerowce: (6.29–6.31),
- zbiornikowce: (6.32–6.34),
- statki LNG: (6.35–6.37).

Z rozwiązania układu równań (10.1) dla zadanej wstępnie prędkości statku V i dla zadanych parametrów wiatru, fali i ewentualnie prądu morskiego otrzymuje się: kąt dryfu statku β , kąt wychylenia steru δ_R , dodatkowy opór od wiatru, prądu, falowania i steru biernego ΔR oraz opór całkowity statku R_C .

Schemat blokowy pełnego algorytmu do obliczania: β , δ_R , ΔR i R_C dla zadanych parametrów ruchu statku: V i ψ oraz parametrów wiatru (V_A , γ_A), fali (H_S , T_I , μ) i prądu (V_C , γ_C) przedstawiono na rysunku 10.1.

Następnie sprawdzano czy układ napędowy statku jest w stanie utrzymać założoną prędkość V w określonych warunkach pogodowych, a jeżeli nie, to poszukiwano takiej prędkości, przy której:

- całkowity opór statku będzie zrównoważony naporem śruby,
- moment na śrubie będzie równy momentowi obrotowemu silnika napędowego,
- punkt pracy silnika napędowego będzie leżał w określonym polu, które można zadeklarować w trakcie wykonywania obliczeń.



Rys. 10.1. Algorytm obliczania całkowitego oporu statku R_C na podstawie modelu parametrycznego (rozdz. 6.)

Źródło: opracowanie własne.

Poszukiwaną chwilową prędkość statku w zadanych warunkach pogodowych obliczano w drugim etapie z układu dwóch kolejnych równań nieliniowych:

$$\begin{aligned} T - \frac{R_C}{1-t} &= 0, \\ Q - \frac{N \cdot \eta_G \eta_S \eta_{RT}}{2\pi n_p} &= 0, \end{aligned} \quad (10.2)$$

gdzie:

T, Q – funkcje aproksymujące napór i moment na śrubie napędowej w postaci równania (8.1),

R_C – opór całkowity statku opisany funkcją aproksymacyjną (rozdz. 6.7) dla danego typu statku,

N – moc silnika napędowego, aproksymowana funkcją odpowiednią dla danego typu statku – tabela 8.13,

t – współczynnik ssania, aproksymowany funkcją odpowiednią dla danego typu statku, tabela – 8.17,

η_{RT} – „sprawność” rotacyjna, aproksymowana funkcją odpowiednią dla danego typu statku – tabela 8.19.

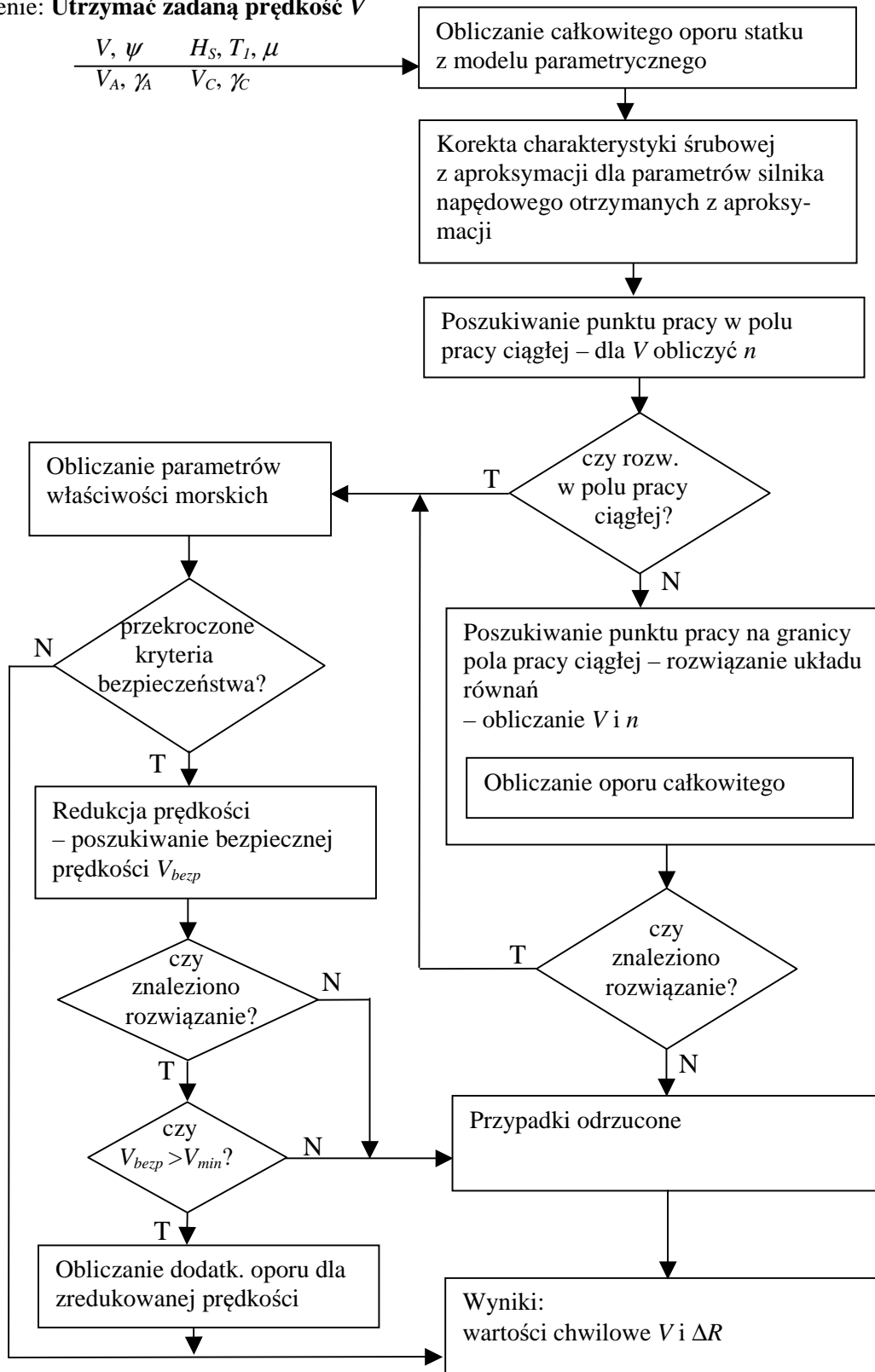
Schemat blokowy algorytmu rozwiązania układu równań (10.2) przedstawiono na rysunku 10.2.

W wyniku rozwiązania układu równań (10.2) otrzymano chwilową prędkość eksploatacyjną jaką może osiągnąć statek, z określonym silnikiem napędowym, w zadanych warunkach pogodowych.

Ponieważ pole pracy silnika napędowego (rys. 7.9) jest ograniczone odpowiednimi charakterystykami, to tylko w niektórych przypadkach można utrzymać zakładaną prędkość V . Jeżeli dodatkowy opór od wiatru i fali jest zbyt duży, to poszukiwana jest możliwa do osiągnięcia prędkość statku na zadanej charakterystyce ograniczającej pole pracy silnika. Po obliczeniu chwilowej prędkości statku w danych warunkach pogodowych obliczane są parametry właściwości morskich. Wartości tych parametrów są porównywane z zadanymi kryteriami (rozdz. 9) i przy ich przekroczeniu następuje redukcja prędkości.

Układy równań (10.1) i (10.2) są rozwiązywane dla wszystkich parametrów pogodowych występujących na akwenach, przez które przebiegają zadane linie żeglugowe – obliczenia wykonywane są dla zadanej prędkości statku V i zadanych kursów ψ . Dla każdego zestawu danych pogodowych otrzymuje się chwilową prędkość eksploatacyjną statku.

Założenie: **Utrzymać zadaną prędkość V**



Rys. 10.2. Algorytm obliczania chwilowej prędkości statku V na podstawie modelu parametrycznego (rozdz. 6. i 8.)

Źródło: opracowanie własne.

10.3. Średnia statystyczna prędkość eksploatacyjna statku na danej linii żeglugowej

Statek na danej linii żeglugowej będzie płynął z zadany kurs ψ i prędkością V wynikającą z aktualnego oporu. Ponieważ na statek będą oddziaływały fale (także wiatr i ewentualnie prąd morski) o różnych parametrach, to i dodatkowy opór statku będzie się zmieniał. Rozwiązując układy równań (10.1) i 10.2) dla wszystkich parametrów pogodowych występujących na akwenach, przez które przebiega dana linia żeglugowa, w długim okresie (np. jeden rok) można określić wartości dodatkowego oporu i prędkości, jakie statek w tych warunkach może osiągnąć. Ponieważ poszczególne parametry pogodowe, jak i parametry ruchu statku, występują z określonym prawdopodobieństwem, to i wartości dodatkowego oporu oraz prędkości statku będą występowały też z określonym prawdopodobieństwem.

Prawdopodobieństwo wystąpienia dodatkowego oporu ΔR o określonej wartości oraz prędkości V , jaką można uzyskać przy wystąpieniu tego dodatkowego oporu, jest więc uzależnione od:

- trasy żeglugi i prawdopodobieństwa przebywania statku na poszczególnych akwenach,
- statystycznych parametrów falowania (H_S , T_I , μ), wiatru (V_A , γ_A) i od prawdopodobieństwa wystąpienia tych parametrów na danych akwenach,
- prawdopodobieństwa wystąpienia parametrów ruchu statku, tj. prędkości V i kursu ψ (prędkość V należy najpierw założyć aby ją później obliczyć i korygować jej założoną wartość).

Prawdopodobieństwo przebywania statku w danej sytuacji podczas żeglugi po sfalowanej wodzie na zadanej trasie jest następujące:

$$p_W = f_A \cdot f_S \cdot f_\mu \cdot f_{HT} \cdot f_V \cdot f_\psi, \quad (10.3)$$

gdzie:

- f_A – prawdopodobieństwo przebywania statku na akwenie A ,
- f_S – prawdopodobieństwo przebywania statku w porze roku S na akwenie A ,
- f_μ – prawdopodobieństwo wystąpienia kierunku fali μ w porze roku S na akwenie A ,
- f_{HT} – prawdopodobieństwo wystąpienia fali o parametrach H_S i T_I z kierunku μ ,
- f_V, f_ψ – prawdopodobieństwa, że statek będzie płynął z prędkością V i kursem ψ .

W podobny sposób można przedstawić prawdopodobieństwo przebywania statku w danej sytuacji dla wiatru – p_A . W obliczeniach dodatkowego oporu od wiatru i fali przyjęto, że prędkość wiatru i wysokość fali będą ze sobą skorelowane, a wtedy $p_W = p_A$. Ponieważ znalezienie się statku w danej sytuacji, dane równaniem (10.3), będzie skutkowało wystąpieniem dodatkowego oporu i osiągnięciem określonej prędkości, to:

$$p_W = p_R = p_V, \quad (10.4)$$

gdzie:

- p_R – cząstkowe (w danych warunkach) prawdopodobieństwo wystąpienia dodatkowego oporu o wartości ΔR_i ,

p_V – cząstkowe (w danych warunkach) prawdopodobieństwo wystąpienia chwilowej prędkości eksploatacyjnej statku o wartości V_i .

Wartości dodatkowego oporu od wiatru R_{xA} i od fali R_{xW} zależą od losowych parametrów fali i wiatru. Stąd też te same wartości R_{xA} i R_{xW} mogą wystąpić dla różnych wartości parametrów $V_A, \gamma_A, H_S, T_L, \mu, V, \psi$. Dla każdej wartości tak obliczonego dodatkowego oporu obliczana jest prędkość statku (przy obliczaniu prędkości statku dla każdej wartości dodatkowego oporu badane będą kryteria ze wzoru (9.1) i ewentualnie dokonywana będzie redukcja prędkości, tak aby przy danym falowaniu i wietrze był spełniony warunek (9.2)).

Łączne prawdopodobieństwa P_{TR} wystąpienia dodatkowego oporu ΔR o określonej wartości i P_{TV} osiągnięcia prędkości statku V wynikającej z tego oporu są równe:

$$P_{TR} = \sum_{A=1}^{n_A} \sum_{S=1}^{n_S} \sum_{\mu=1}^{n_\mu} \sum_{HT=1}^{n_{HT}} \sum_{V=1}^{n_V} \sum_{\psi=1}^{n_\psi} p_{Ri}[\Delta R_i], \quad (10.5)$$

$$P_{TV} = \sum_{A=1}^{n_A} \sum_{S=1}^{n_S} \sum_{\mu=1}^{n_\mu} \sum_{HT=1}^{n_{HT}} \sum_{V=1}^{n_V} \sum_{\psi=1}^{n_\psi} p_{Vi}[V_i(R + \Delta R_i)], \quad (10.6)$$

gdzie:

- R – opór statku na wodzie spokojnej,
- ΔR_i – chwilowa wartość dodatkowego oporu o prawdopodobieństwie wystąpienia p_{Ri} ,
- $V_i(R + \Delta R_i)$ – chwilowa prędkość eksploatacyjna statku, w funkcji chwilowego dodatkowego oporu, o prawdopodobieństwie wystąpienia p_{Vi} ,
- $n_A, n_S, n_\mu, n_{HT}, n_V, n_\psi$ – ilości akwenów, przez które płynie statek, pór roku, kierunków fali, parametrów fali, prędkości i kursów statku.

Wykonując, dla wszystkich występujących na danej linii żeglugowej parametrów pogody i parametrów ruchu statku, obliczenia:

- wartości dodatkowego oporu ΔR_i i prawdopodobieństwa jego wystąpienia p_{Ri} ,
- wartości prędkości statku V_i (wynikającej z oporu R na wodzie spokojnej i dodatkowego oporu ΔR_i) i prawdopodobieństwa jej wystąpienia p_{Vi} , oraz
- grupując otrzymane wartości ΔR_i i V_i w określone przedziały,

otrzymuje się histogramy słupkowe dla dodatkowego oporu ΔR i prędkości statku V . Z tych histogramów można obliczyć średnie statystyczne, w długim okresie, wartości dodatkowego oporu $\Delta \bar{R}$ i prędkości statku \bar{V}_E na założonej trasie żeglugi:

$$\Delta \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{n_R} P_{TRi} \cdot (\Delta R_i = \text{const})}{\sum_{i=1}^{n_R} P_{TRi}}, \quad (10.7)$$

$$\bar{V}_E = \frac{\sum_{i=1}^{n_V} P_{TVi} \cdot V_i(R + \Delta R_i = \text{const})}{\sum_{i=1}^{n_V} P_{TVi}}, \quad (10.8)$$

gdzie:

n_R – ilość przedziałów zawierających dodatkowe opory o zbliżonych wartościach,

n_V – ilość przedziałów zawierających chwilowe prędkości eksploatacyjne statku o zbliżonych wartościach.

11. WYKORZYSTANIE OPRACOWANEJ METODY DO PROGNOZOWANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU TRANSPORTOWEGO NA LINII ŻEGLUGOWEJ NA ETAPIE PROJEKTOWANIA WSTĘPNEGO

11.1. Wstęp

Opracowaną metodę i zawarty w niej model parametryczny zastosowano do prognozowania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego na zadanej linii żeglugowej. W tym celu dla statków z bazy B, dla których istnieje pełna dokumentacja, łącznie z badaniami modelowymi i pomiarami na mili pomiarowej (próby zdawczo-odbiorcze zbudowanego statku), oraz dla wybranych linii żeglugowych wykonano:

- obliczenia średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej z modelu parametrycznego,
- otrzymane wyniki porównano z obliczeniami „wzorcowymi” wykonanymi na podstawie pełnej dokumentacji oraz badań modelowych i pomiarów na mili pomiarowej.

Jest to więc ostateczny test poprawności modelu parametrycznego i opracowanej metody prognozowania prędkości eksploatacyjnej statku transportowego na linii żeglugowej.

11.2. Parametry badanych statków i linie żeglugowe

Obliczenia średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej wykonano dla statków z bazy B – tabela 3.1 – na wybranych liniach żeglugowych z tabeli 11.1 (linie nr 2 i nr 9, na każdej linii statek płynie w obu kierunkach: linia nr 2 a – z USA do Europy, linia nr 2 b – w odwrotnym kierunku).

Tabela 11.1. Wykaz linii żeglugowych, wykorzystanych do obliczeń dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej statku

Nr linii żeglugowej	Nazwa
1	Ameryka Płd. – Europa Zach.
2	USA Wsch. – Europa Zach.
3	USA Wsch. – Zatoka Meksykańska – Europa Zach.
4	USA Wsch. – Morze Śródziemne – Europa Zach.
5	Indonezja – Japonia
6	Zatoka Perska – Japonia
7	Afryka Płn. – Europa Zach.
8	Afryka Płn. – USA Wsch.
9	Zatoka Perska – Afryka – Europa Zach.
10	Europa Zach. – Morze Śródziemne – Zatoka Perska – Japonia
11	Europa Zach. – Kanał Panamski – USA Zach.
12	Europa Zach. – Ameryka Łacińska

Źródło: opracowanie własne.

Z wybranych linii żeglugowych linia nr 2 jest najtrudniejsza ze względu na występujące warunki pogodowe, natomiast linia nr 9 jest najłatwiejsza.

Do każdej linii żeglugowej wyznaczono akweny, przez które ona przebiega, oraz przypisano parametry pogodowe (średnie statystyczne długoterminowe – dla wiatru i falowania oraz deterministyczne – dotyczące morskich prądów powierzchniowych – rozdz. 4).

Ustalono także parametry opisujące linie żeglugowe, a wymagane w opracowanej metodzie (rozdz. 10.3) – parametry te dla tras nr 2 i 9 zawarte są w tabeli 11.2 (w tabeli podane są numery akwenów, przez które przebiega trasa według atlasu [33], prawdopodobieństwo przebywania na danym akwencie oraz kursy statku i ich prawdopodobieństwa).

Tabela 11.2. Parametry opisujące wybrane linie żeglugowe

Trasa nr 2 a	USA Wschodnie – Europa Zachodnia													
Nr akwenu	9	10		11	7	8								
f_A	0,07	0,42		0,15	0,29	0,07								
Kurs [°]	80	80	60	55	55	60								
f_ψ	1	0,32	0,68	1	1	1								
Trasa nr 2 b	Europa Zachodnia – USA Wschodnie													
Nr akwenu	8	7	11	10		9								
f_A	0,07	0,29	0,15	0,42		0,07								
Kurs [°]	240	235	235	240	260	260								
f_ψ	1	1	1	0,68	0,32	1								
Trasa nr 9 a	Zatoka Perska – Afryka – Europa Zachodnia													
Nr akwenu	23		29	42	45		41	34	28	18		11	7	8
f_A	0,11		0,12	0,06	0,16		0,06	0,14	0,08	0,12		0,07	0,05	0,03
Kurs [°]	175	205	195	190	230	325	340	325	320	320	0	20	45	45
f_ψ	0,4	0,6	1	1	0,57	0,43	1	1	1	0,18	0,82	1	1	1
Trasa nr 9 b	Europa Zachodnia – Afryka – Zatoka Perska													
Nr akwenu	8	7	11	18		28	34	41	45		42	29	23	
f_A	0,03	0,05	0,07	0,12		0,08	0,14	0,06	0,016		0,06	0,12	0,11	
Kurs [°]	225	225	200	180	140	140	145	160	145	50	10	15	25	335
f_ψ	1	1	1	0,82	0,18	1	1	1	0,43	0,57	1	1	0,6	0,4

Źródło: opracowanie własne.

11.3. Wyniki obliczeń prędkości eksploatacyjnej dla przykładowych statków i wybranych linii żeglugowych

Wynikami obliczeń dla badanych statków z bazy B i dla każdej linii żeglugowej są histogramy słupkowe dla dodatkowego oporu ΔR i prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E , jaką może statek uzyskać, przy założeniu, że będzie utrzymywany zadany kurs statku w danych warunkach pogodowych (czyli dla dodatkowego oporu ΔR).

Pod histogramami, dla badanego statku i dla danej linii żeglugowej, w odpowiednich tabelkach zamieszczone są następujące informacje:

- zadana prędkość eksploatacyjna V_{ZE} ,
- średnia statystyczna prędkość eksploatacyjna statku \bar{V}_E na danej linii żeglugowej,
- prawdopodobieństwo P_{VE} utrzymania na danej linii żeglugowej zadanej prędkości eksploatacyjnej V_{ZE} , przy utrzymaniu zadanego kursu,
- opór na wodzie spokojnej dla prędkości kontraktowej V_K ,
- średni statystyczny dodatkowy opór $\Delta\bar{R}$ obliczony ze wzoru (10.7),
- przyrost oporu obliczony z zależności:

$$PR = \frac{\Delta\bar{R}}{R} \cdot 100\% . \quad (11.1)$$

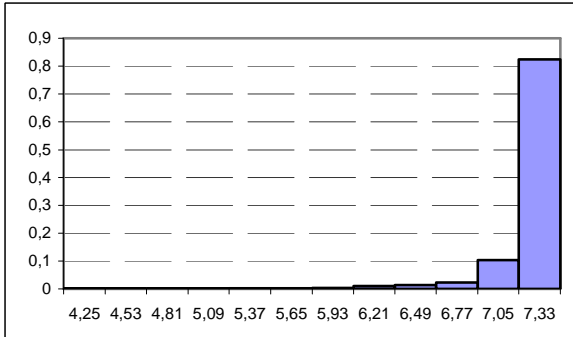
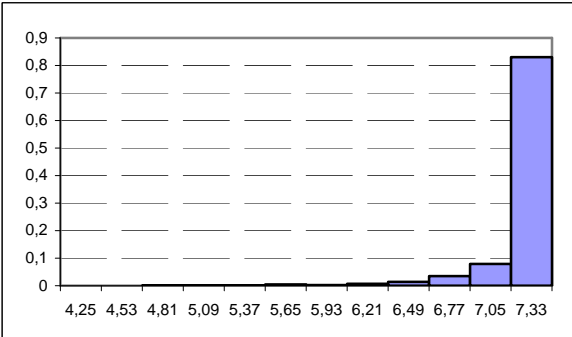
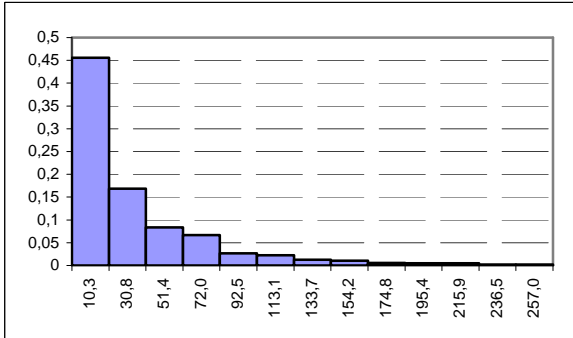
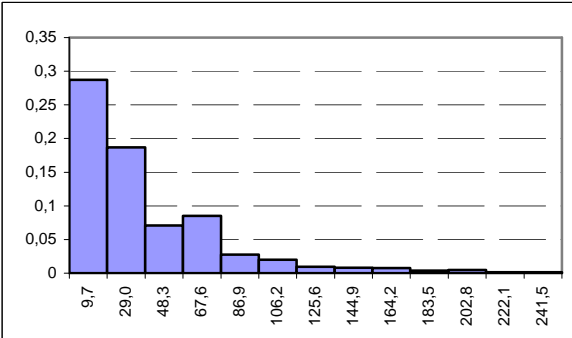
Powyższy zakres obliczeń jest taki sam zarówno dla obliczeń „wzorcowych” (rozdz. 5 i 7), jak i z wykorzystaniem metod parametrycznych (rozdz. 6 i 8).

Przykładowe wyniki obliczeń dla statków z bazy B przedstawiono na rysunkach 11.1–11.8.

Najważniejsze wyniki obliczeń, czyli średnie statystyczne prędkości eksploatacyjne \bar{V}_E dla statków z bazy B, otrzymane z dwóch różnych metod, zamieszczono w tabeli 11.3, łącznie z względnym błędem pomiędzy wynikami uzyskanymi z opracowanych metod parametrycznych (rozdz. 6 i 8) a obliczeniami „wzorcowymi” (rozdz. 5. i 7.).

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: M1, trasa nr 2 a

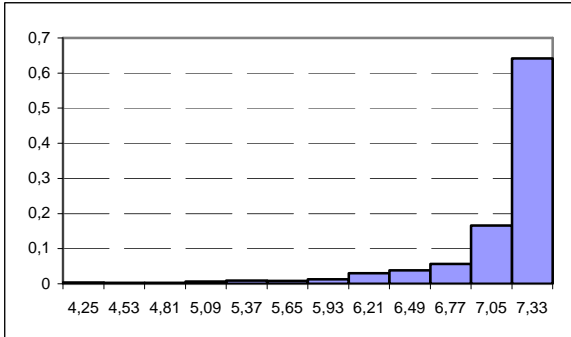
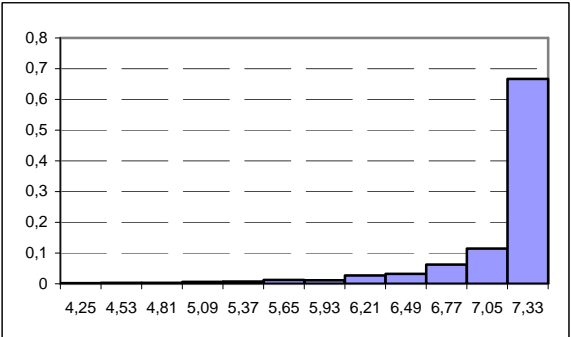
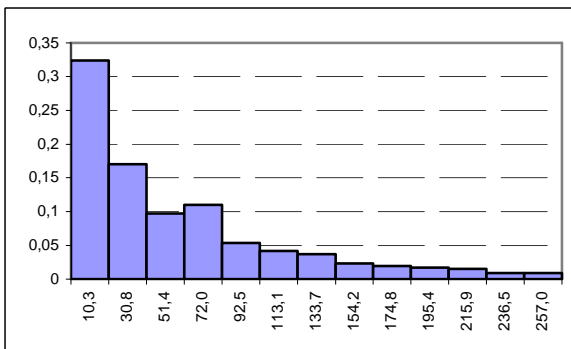
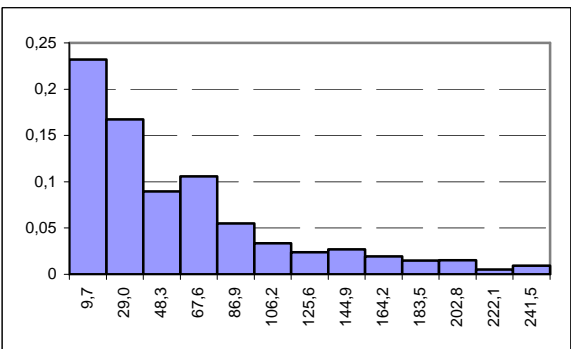
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,22	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,24
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	82,4	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	83,0
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	431,8	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	405,8
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	38,95	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	39,97
Przyrost oporu [%]		9,02	Przyrost oporu [%]		9,85

Rys. 11.1. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku M1 na trasie 2 a

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: M1, trasa nr 2 b

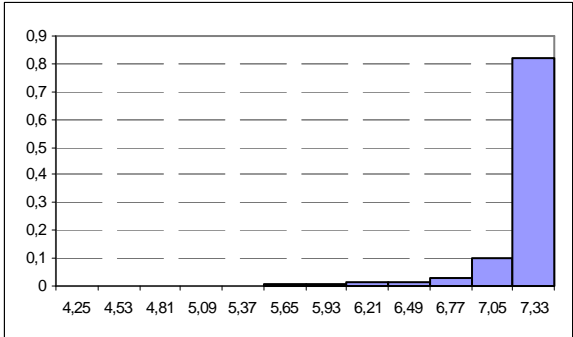
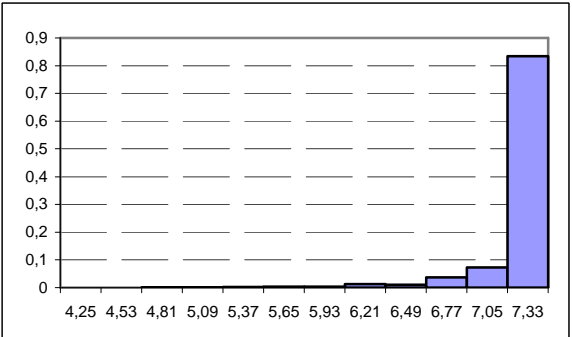
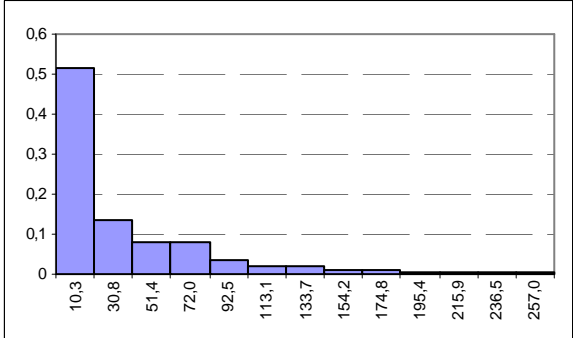
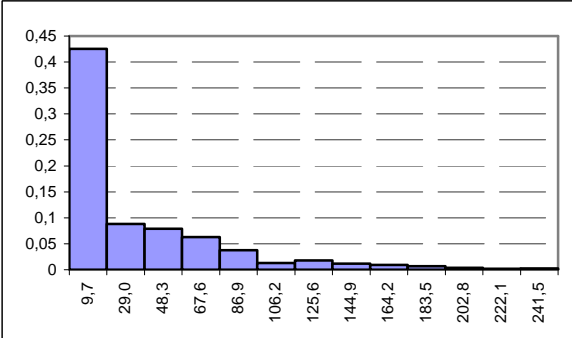
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,05	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,07
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	64,1	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	66,7
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	431,8	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	405,8
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	68,06	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	63,78
Przyrost oporu [%]		15,76	Przyrost oporu [%]		15,72

Rys. 11.2. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku M1 na trasie 2 b

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: M1, trasa nr 9 a

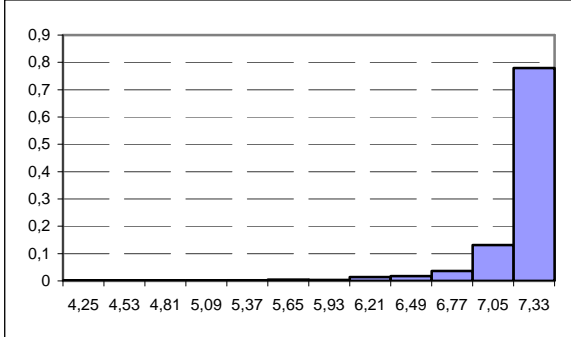
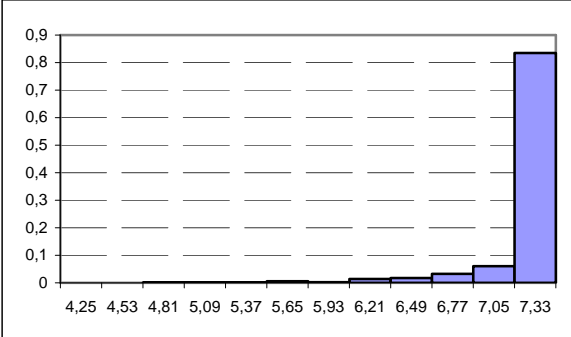
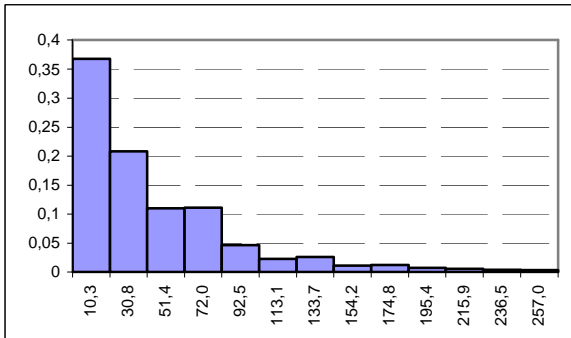
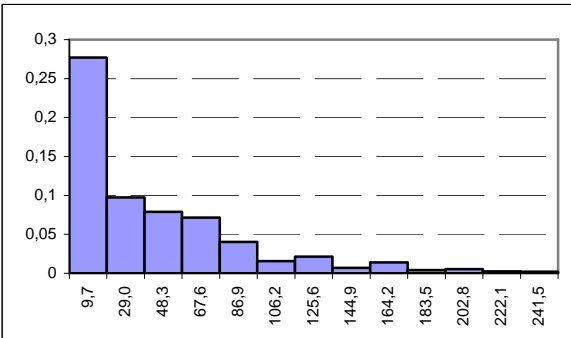
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,22	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,24
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	82,2	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	83,4
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	431,8	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	405,8
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	39,91	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	37,43
Przyrost oporu [%]		9,24	Przyrost oporu [%]		9,22

Rys. 11.3. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku M1 na trasie 9 a

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: M1, trasa nr 9 b

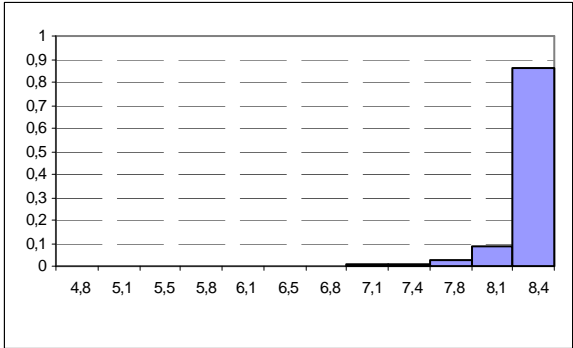
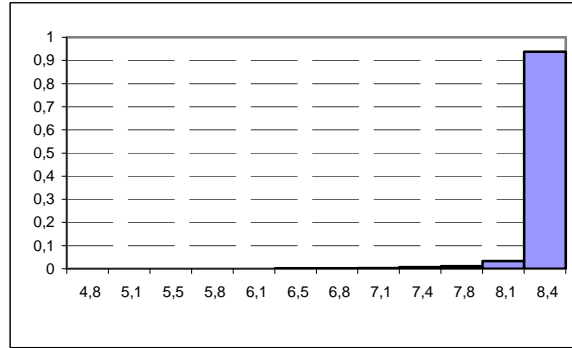
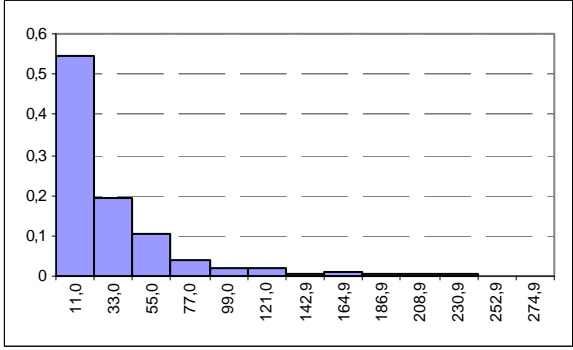
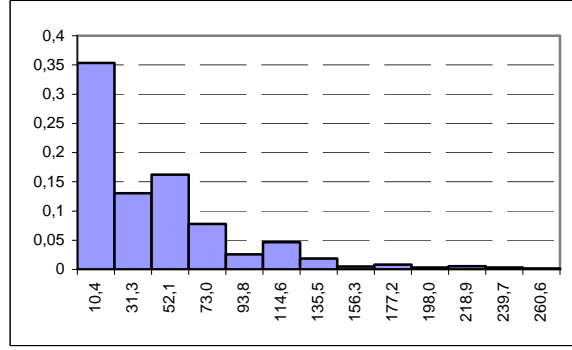
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	7,33
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,20	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	7,23
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	78,0	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	83,5
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	431,8	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	405,8
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	48,21	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	45,30
Przyrost oporu [%]		11,16	Przyrost oporu [%]		11,16

Rys. 11.4. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku M1 na trasie 9 b

Źródło: opracowanie własne

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: K1, trasa nr 2 a

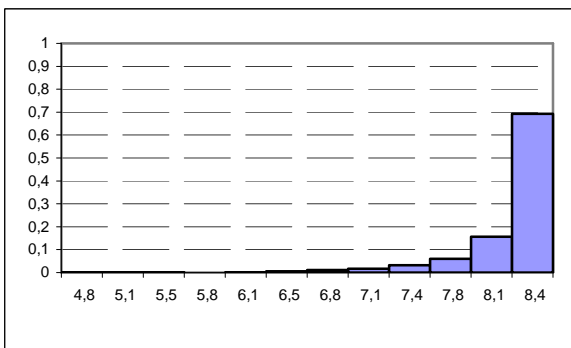
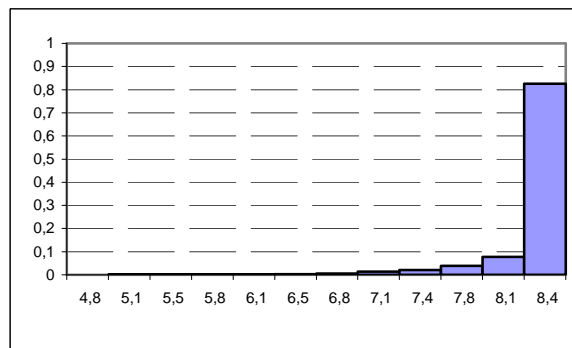
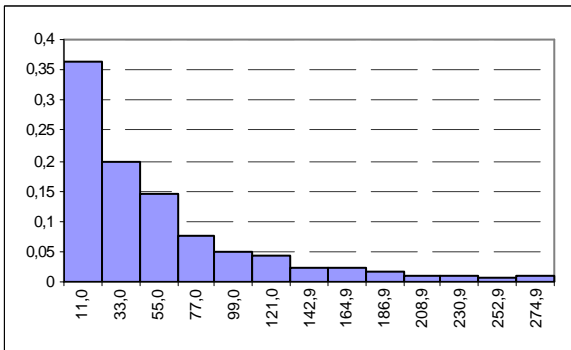
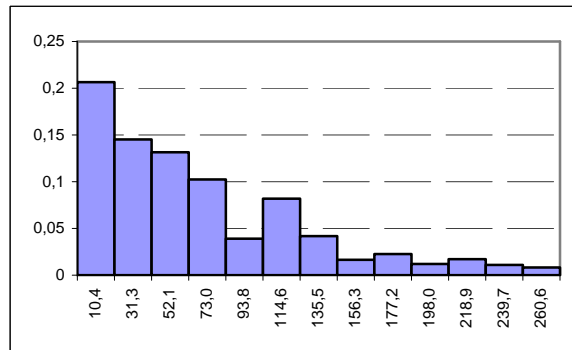
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,34	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,38
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	86,7	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	93,8
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	462,0	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	437,9
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	32,58	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	46,75
Przyrost oporu [%]		7,05	Przyrost oporu [%]		10,68

Rys. 11.5. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku K1 na trasie 2 a

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: K1, trasa nr 2 b

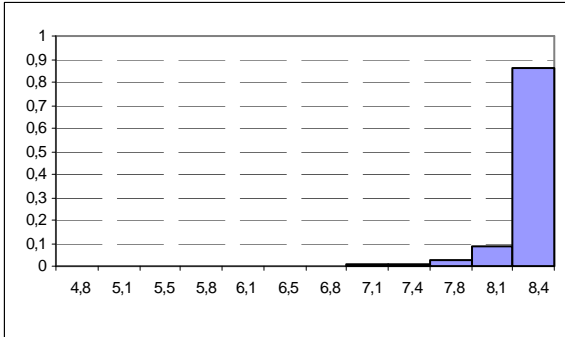
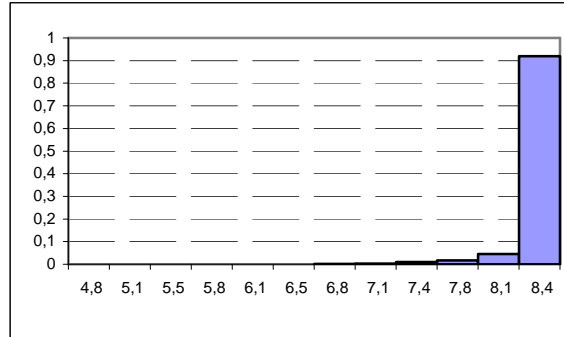
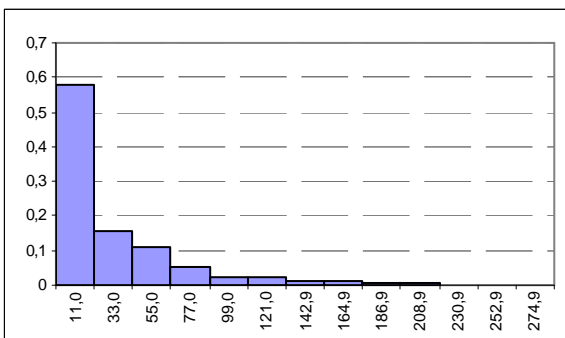
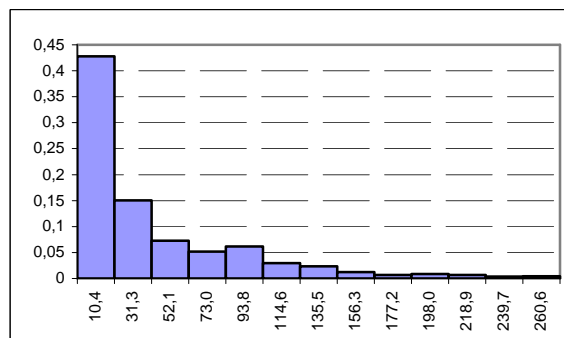
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,21	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,30
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	69,3	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	82,5
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	462,0	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	437,9
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	55,90	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	76,78
Przyrost oporu [%]		12,10	Przyrost oporu [%]		17,53

Rys. 11.6. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku K1 na trasie 2 b

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: K1, trasa nr 9 a

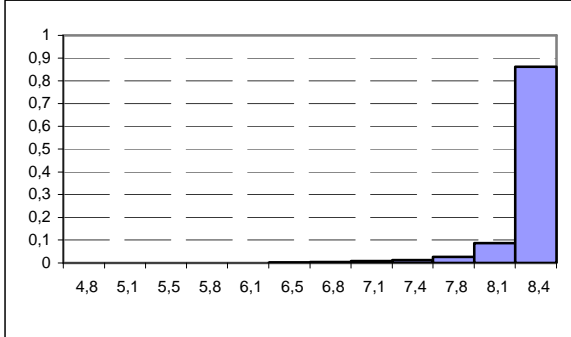
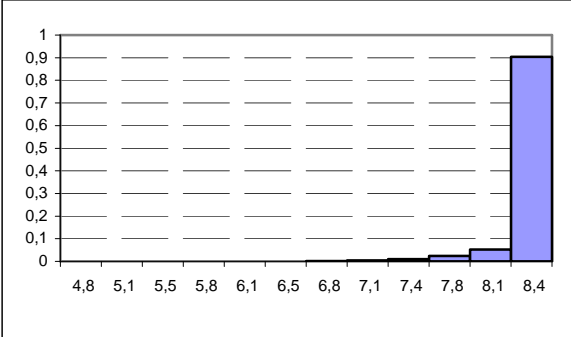
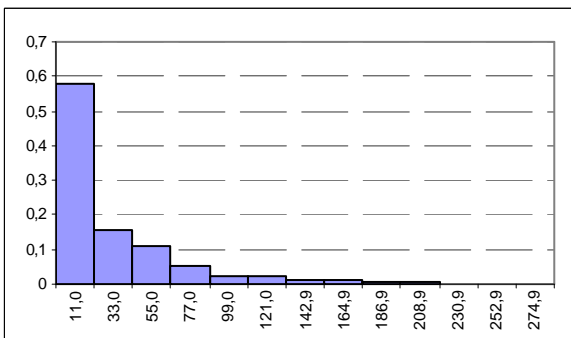
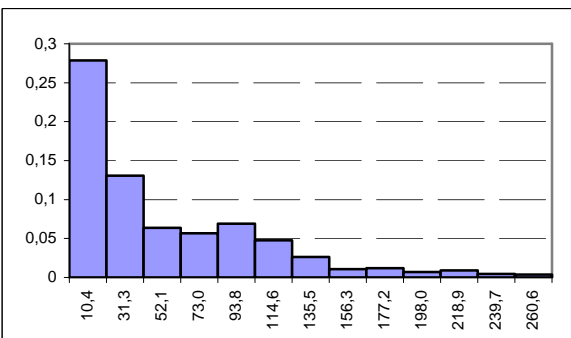
Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44	Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]	V_{ZE}	8,44
Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,35	Średnia prędkość [m/s]	\bar{V}_E	8,38
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	86,1	Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]	P_{VE}	91,9
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	462,0	Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]	R	437,9
Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	33,98	Średni opór dodatk. [kN]	$\Delta \bar{R}$	45,76
Przyrost oporu [%]		7,35	Przyrost oporu [%]		10,45

Rys. 11.7. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku K1 na trasie 9 a

Źródło: opracowanie własne.

Średnia statystyczna eksploatacyjna prędkość statku transportowego
(średnie statystyczne warunki pogodowe dla roku)

Statek: K1, trasa nr 9 b

Obliczenia „wzorcowe” (rozdz. 5. i 7.)			Obliczenia z wykorzystaniem aproksymacji (rozdz. 6. i 8.)		
Histogram prędkości eksploatacyjnej					
					
Zadana prędkość eksploatacyjna [m/s]			V_{ZE}	8,44	
Średnia prędkość [m/s]			\bar{V}_E	8,33	
Prawdopodobieństwo V_{ZE} [%]			P_{VE}	83,0	
Histogram dodatkowego oporu					
					
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]			R	462,0	
Średni opór dodatk. [kN]			$\Delta \bar{R}$	40,67	
Przyrost oporu [%]				8,80	
Opór na wodzie spokojnej dla prędkości V_K [kN]			R	437,9	
Średni opór dodatk. [kN]			$\Delta \bar{R}$	57,40	
Przyrost oporu [%]				13,11	

Rys. 11.8. Histogramy dodatkowego oporu i prędkości eksploatacyjnej uzyskane z obliczeń „wzorcowych” oraz obliczeń z wykorzystaniem aproksymacji dla statku K1 na trasie 9 b

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 11.3. Błąd względny (δV_E) obliczania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E z wzorów aproksymacyjnych (rozdz. 6. i 8.) w stosunku do „wzorcowych” (rozdz. 5. i 7.) dla wybranych statków (baza B) i wybranych tras żeglugi

Statek (baza B) tabela 3.1	Trasa żeglugi (tabela 11.2)											
	2 a			2 b			9 a			9 b		
	\bar{V}_E [m/s]		δV_E [%]	\bar{V}_E [m/s]		δV_E [%]	\bar{V}_E [m/s]		δV_E [%]	\bar{V}_E [m/s]		δV_E [%]
	wzor.	apr.		wzor.	apr.		wzor.	apr.		wzor.	apr.	
K1	8,34	8,38	0,5	8,21	8,30	1,1	8,35	8,38	0,4	8,33	8,37	0,5
K3	11,3	11,34	0,4	11,21	11,30	0,8	11,36	11,35	0,1	11,31	11,5	0,4
M1	7,22	7,24	0,3	7,05	7,07	0,3	7,22	7,24	0,3	7,20	7,23	0,4
M2	7,38	7,35	0,3	7,23	7,13	1,4	7,40	7,27	1,8	7,38	7,23	2,0
M3	8,57	8,54	0,4	8,41	8,33	1,0	8,58	8,50	0,9	8,56	8,46	1,2

Źródło: opracowanie własne.

Z analizy przedstawionych w tabeli 11.3 wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

– błąd względny obliczania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku jest rzędu od 0,1% do 2,0% w zależności od badanego statku i linii żeglugowej; dokładność obliczeń prędkości eksploatacyjnej z wykorzystaniem opracowanych metod parametrycznych jest więc wysoka;

– przy obliczaniu prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E z wykorzystaniem opracowanej metody parametrycznej utrzymuje się taki sam trend jak dla metod dokładnych (obliczenia „wzorcowe”), tzn. jeżeli w obliczeniach wzorcowych dla trasy „łatwiejszej” prędkość eksploatacyjna była większa niż na „trudniejszej”, to tak samo jest przy obliczeniach wykorzystujących modele parametryczne;

– zamieszczone wyniki obliczeń wskazują również na fakt, że nie wszystkie statki, szczególnie ich układy napędowe, zostały zbyt dobrze zaprojektowane – wskazuje na to stosunek prędkości kontraktowej (na wodzie spokojnej) do prędkości eksploatacyjnej na zadanej linii żeglugowej w średnich statystycznych warunkach pogodowych.

11.4. Wnioski z przeprowadzonych obliczeń prędkości eksploatacyjnej statku transportowego za pomocą metody parametrycznej

Obliczanie średniej statystycznej długoterminowej prędkości eksploatacyjnej wykonano dla statków z bazy B: masowców i kontenerowców dla dwóch tras żeglugowych – nr 2 (gorsze warunki pogodowe) i nr 9 (łagodniejsze warunki pogodowe). Obliczenia prędkości eksploatacyjnej na tych trasach wykonano:

– za pomocą algorytmu przedstawionego w rozdziałach 5. i 7. (tzw. obliczenia „wzorcowe”),

– wykorzystując opracowane aproksymacje zawarte w rozdziałach 6., 8. i 9.

Obliczenia „wzorcowe” były porównywane: z pomiarami doświadczalnymi w basenie modelowym, z pomiarami na mili pomiarowej dla statków zbudowanych oraz porównywane z eksploatacją tych statków w rzeczywistych warunkach pogodowych [83]. Do tych obliczeń niezbędna była pełna dokumentacja statku z napędem, geometria śruby i steru płetwowego.

Obliczenia wykonane przy wykorzystaniu opracowanych aproksymacji bazowały tylko na podstawowych parametrach projektowych, których liczba nie przekracza wykazu zamieszczonego w rozdziale 3.6:

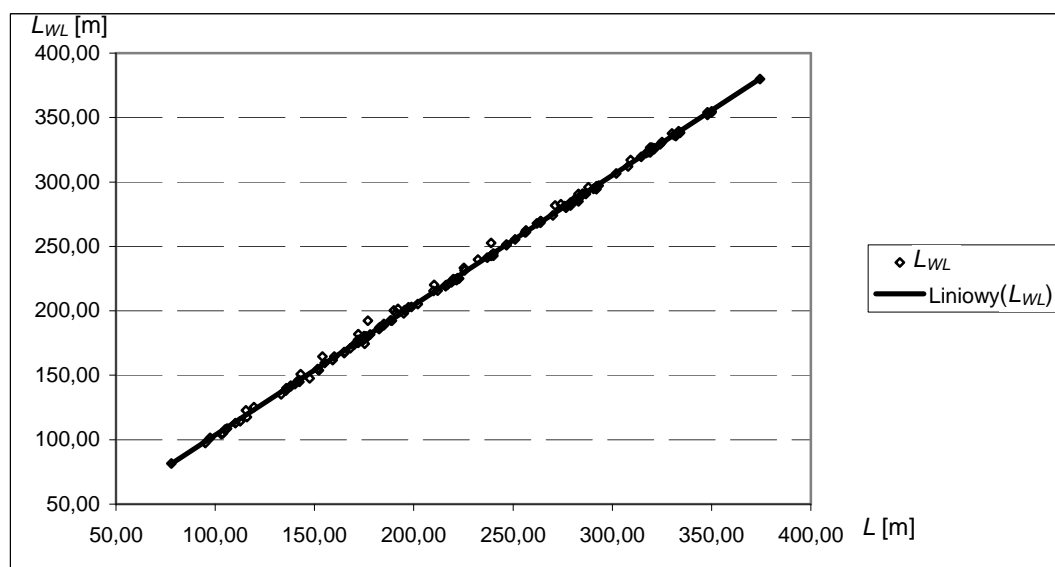
- L – długość statku między pionami,
- L_{WL} – długość statku na wodnicy pływania,
- B – szerokość statku,
- T – zanurzenie do L_{WL} ,
- ∇ – objętość podwodnej części kadłuba (wyporność) dla T ,
- C_B – współczynnik pełnotliwości kadłuba,
- C_{WP} – współczynnik pełnotliwości wodnicy,
- C_P – współczynnik pełnotliwości wzdłużnej, walcowej.

Mimo tak ograniczonej liczby parametrów geometrycznych kadłuba statku, znanych na etapie projektowania wstępnego, wykonane obliczenia – średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E statku na linii żeglugowej w statystycznych rocznych warunkach pogodowych – są wyjątkowo dokładne w stosunku do obliczeń „wzorcowych” wykorzystujących pełną informację o geometrii i innych parametrach statku.

Względny błąd obliczenia średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku \bar{V}_E jest rzędu ułamka procenta, mimo że funkcje aproksymacyjne zawierają tylko kilka podstawowych parametrów geometrycznych statku. Można więc stwierdzić, że:

- **postawione w rozdziałach 6. i 8. hipotezy robocze są prawidłowe,**
- **cel badań przedstawiony w rozdziale 2.3 w całości osiągnięto.**

Przedstawiona liczba parametrów geometrycznych, wykorzystanych w równaniach aproksymacyjnych, może być jeszcze skrócona, ponieważ pomiędzy długością między pionami L a długością na wodnicy L_{WL} istnieje bardzo dokładna zależność. Dla statków z bazy A opracowano zależność regresyjną $L_{WL} = f(L)$ – wynik tych badań przedstawiono na rysunku 11.9.



Rys. 11.9. Aproksymacja długością na wodnicy L_{WL} w zależności od długości statku między pionami L
 Źródło: opracowanie własne.

Otrzymana zależność jest następująca:

$$L_{WL} = 2,75 + 1,0082 \cdot L \quad (11.2)$$

dla wszystkich typów statków.

W równaniach parametrycznych dotyczących oporu na wodzie spokojnej (rozdz. 6.2) wystarczy za L_{WL} podstawić równanie (11.2) i w ten sposób, bez utraty dokładności obliczeń średniej prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E , ograniczyć liczbę parametrów geometrycznych projektowanego statku.

Podczas obliczeń „wzorcowych”, zamieszczonych w publikacjach [98, 104], badano m.in.:

- jaki wpływ na prędkość eksploatacyjną ma celowa redukcja prędkości podczas przekraczania dopuszczalnych wartości parametrów właściwości morskich wywołanych falowaniem,
- jaki wpływ na prędkość eksploatacyjną ma spadek naporu w wyniku wynurzenia się śruby podczas pływania w warunkach sztormowych.

Celowa redukcja prędkości statku

W rozdziale 9. przedstawiono algorytm i metodę parametryczną obliczania właściwości morskich podczas pływania statku na sfalowanej wodzie oraz kryteria ewentualnej redukcji prędkości statku. Wykonane obliczenia „wzorcowe” [98, 104] pokazują w ilu przypadkach na danej linii żeglugowej i dla danego statku niezbędna jest redukcja prędkości. Na rysunku 11.10 pokazano liczbę przypadków (podaną w %), w stosunku do wszystkich analizowanych parametrów falowania (tabela 4.4), występujących na zadanej linii żeglugowej. Z przedstawionych obliczeń (rys. 11.10) wynika, że liczba tych przypadków jest rzędu ułamka procenta dla wszystkich analizowanych tras i badanych statków.

Konieczność redukcji prędkości, przy przekroczeniu dopuszczalnych wartości właściwości morskich, powoduje spadek średniej prędkości eksploatacyjnej dla całej linii żeglugowej. W tabeli 11.4 pokazano wyniki obliczeń dla statku M2, jakie jest zmniejszenie średniej prędkości eksploatacyjnej w stosunku do przypadku gdyby, mimo przekroczenia kryteriów właściwości morskich, nie dokonano redukcji.

Z przedstawionych analiz wynika, że celowa redukcja prędkości, ze względu na właściwości morskie, ma znikomy wpływ na końcową średnią prędkość eksploatacyjną dla całej linii żeglugowej – spadek prędkości w wyniku redukcji jest rzędu ułamka procenta (tabela 11.4).

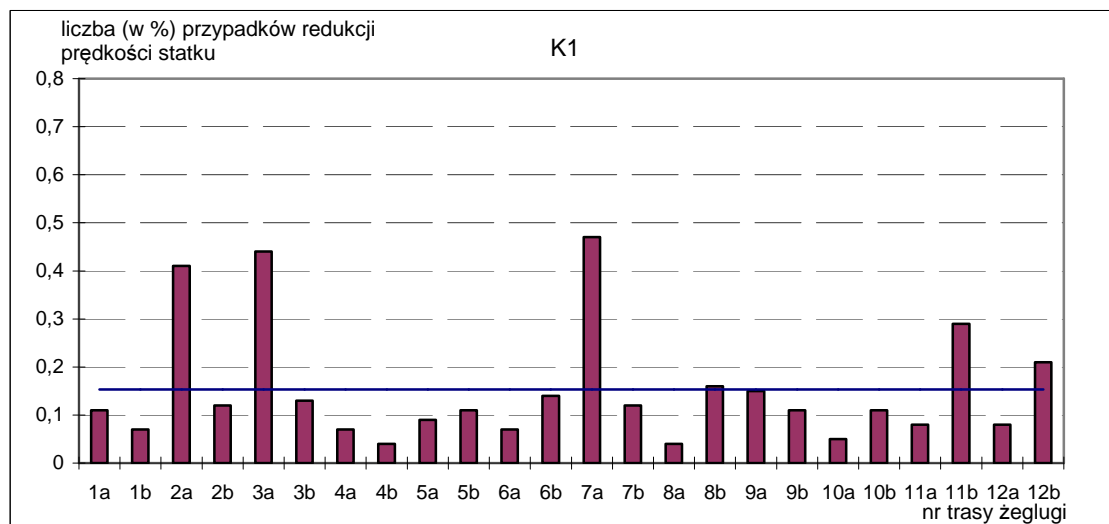
Podczas prowadzonych badań, dla niektórych pojedynczych statków spadek średniej prędkości eksploatacyjnej był większy (rzędu kilku %), co świadczy o tym, że kadłuby tych statków nie były zbyt dobrze zaprojektowane ze względu na właściwości morskie.

Ponieważ równania parametryczne do obliczania wartości właściwości morskich są dość złożone (sztuczne sieci neuronowe – rozdz. 9.), to bez istotnej utraty dokładności obliczeń prędkości eksploatacyjnej można je pominąć. Obliczenia prędkości eksploatacyjnej statku z modelu aproksymacyjnego w tej sytuacji znacząco się uproszczą.

Tabela 11.4. Wpływ celowej redukcji prędkości na średnią prędkość eksploatacyjną statku M2 na różnych liniach żeglugowych

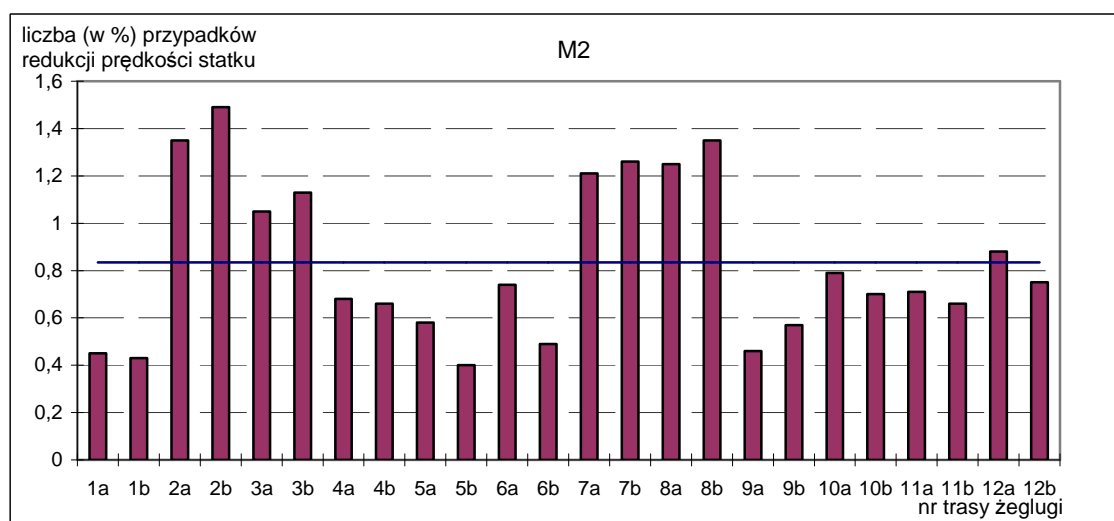
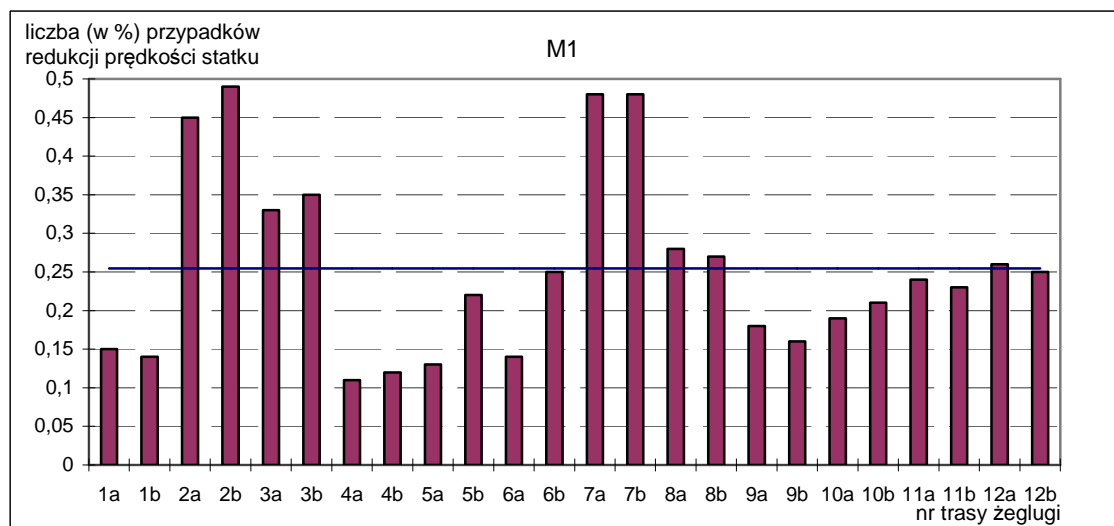
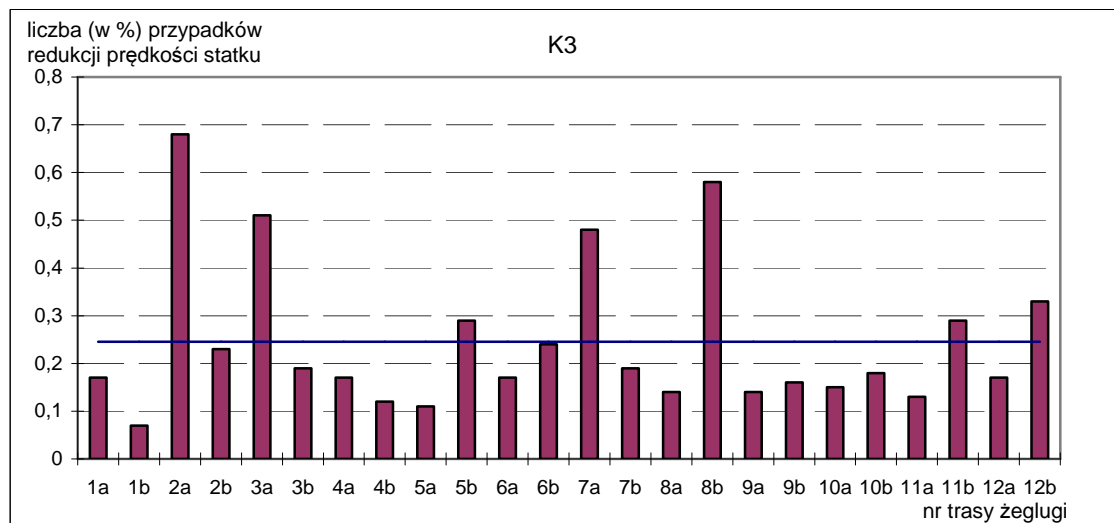
Nr trasy	$V_{\text{sr. red.}}$ [m/s]	$V_{\text{sr. bark. red.}}$ [m/s]	P_{VE} [%]	$V_1 = V_{\text{sr. red.}}/V_K$ [%]	$V_2 = V_{\text{sr. bark. red.}}/V_K$ [%]	$V_2 - V_1$ [%]
1 a	7,41	7,42	81,53	98,67	98,80	0,13
1 b	7,41	7,42	85,78	98,67	98,80	0,13
2 a	7,38	7,40	82,36	98,27	98,54	0,27
2 b	7,23	7,25	66,92	96,27	96,54	0,27
3 a	7,39	7,41	82,34	98,40	98,67	0,27
3 b	7,29	7,31	74,01	97,07	97,34	0,27
4 a	7,40	7,41	81,49	98,54	98,67	0,13
4 b	7,41	7,42	85,57	98,67	98,80	0,13
5 a	7,36	7,37	80,83	98,00	98,14	0,13
5 b	7,46	7,46	91,78	99,33	99,33	0,00
6 a	7,37	7,38	81,29	98,14	98,27	0,13
6 b	7,43	7,44	86,70	98,93	99,07	0,13
7 a	7,34	7,36	77,06	97,74	98,00	0,27
7 b	7,29	7,30	72,03	97,07	97,20	0,13
8 a	7,29	7,31	71,70	97,07	97,34	0,27
8 b	7,39	7,43	83,93	98,40	98,93	0,53
9 a	7,40	7,41	83,83	98,54	98,67	0,13
9 b	7,38	7,39	81,34	98,27	98,40	0,13
10 a	7,39	7,41	84,64	98,40	98,67	0,27
10 b	7,41	7,43	85,89	98,67	98,93	0,27
11 a	7,36	7,37	81,10	98,00	98,14	0,13
11 b	7,41	7,42	85,19	98,67	98,80	0,13
12 a	7,34	7,36	79,42	97,74	98,00	0,27
12 b	7,39	7,41	81,34	98,40	98,67	0,27

Źródło: opracowanie i obliczenia własne.



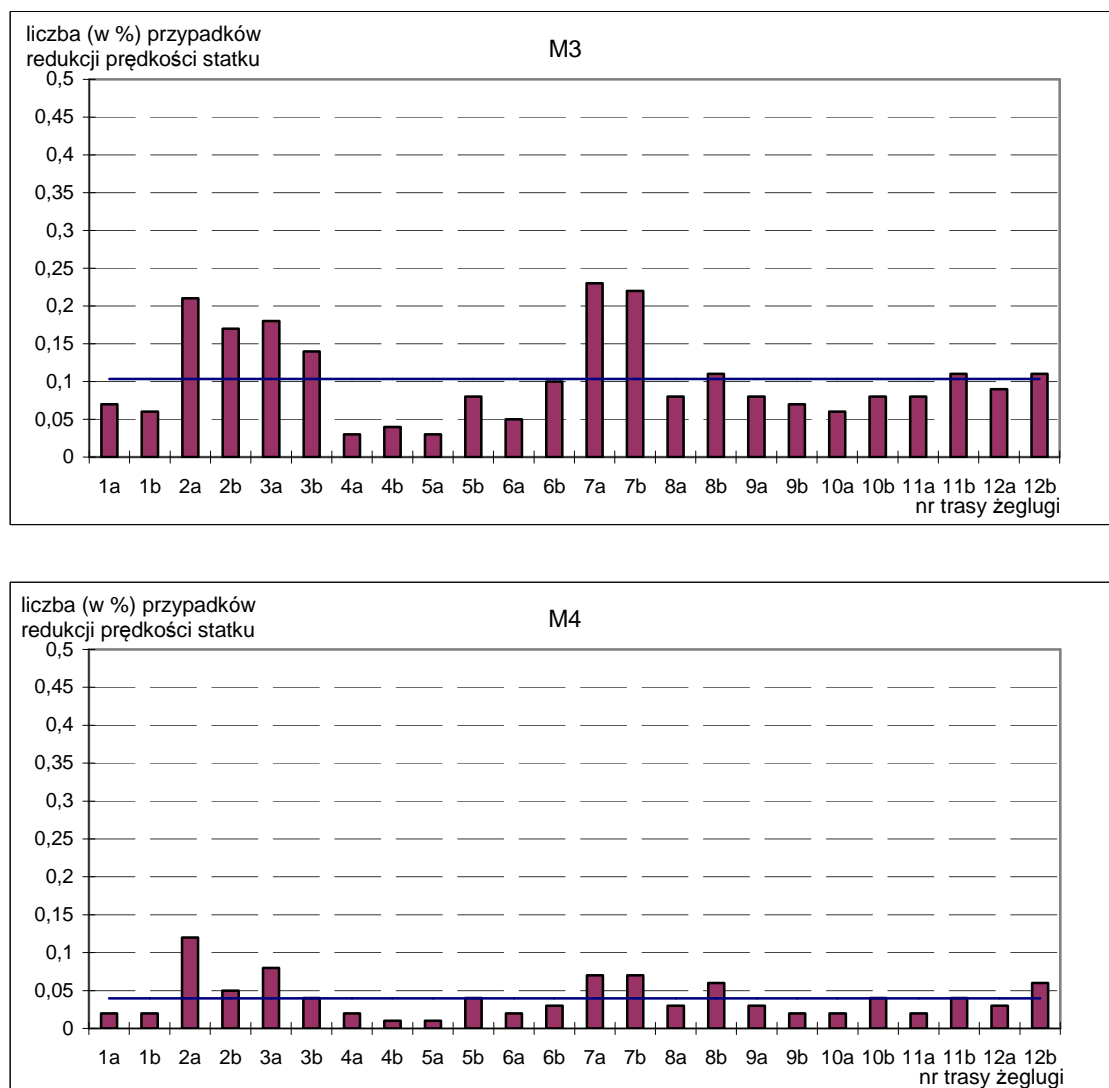
Rys. 11.10. Liczba przypadków redukcji prędkości statku w wyniku przekroczenia kryteriów właściwości morskich dla statków (z bazy B) na różnych liniach żeglugowych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11.10. Liczba przypadków redukcji prędkości statku w wyniku przekroczenia kryteriów właściwości morskich dla statków (z bazy B) na różnych liniach żeglugowych (cd.)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11.10. Liczba przypadków redukcji prędkości statku w wyniku przekroczenia kryteriów właściwości morskich dla statków (z bazy B) na różnych liniach żeglugowych (cd.)

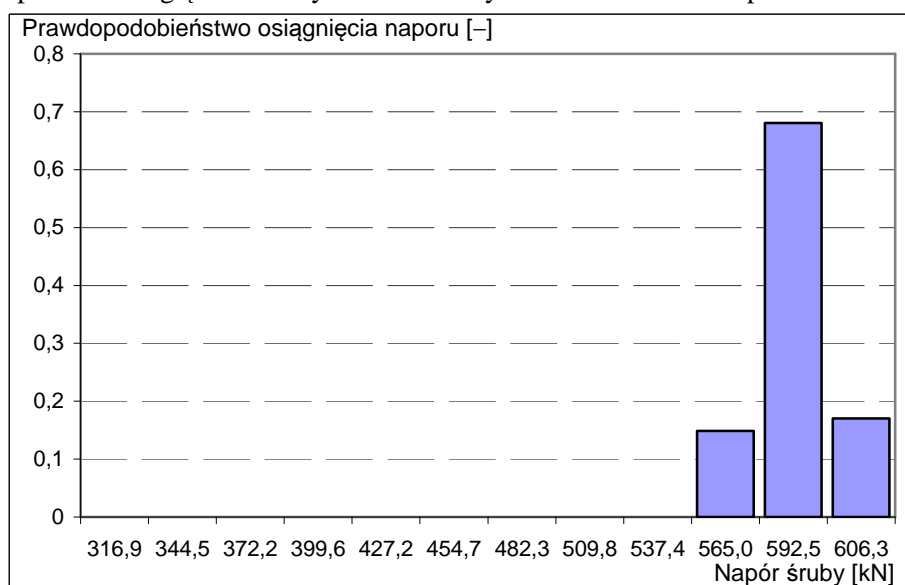
Źródło: opracowanie własne.

Spadek prędkości statku w wyniku wynurzenia się śruby napędowej

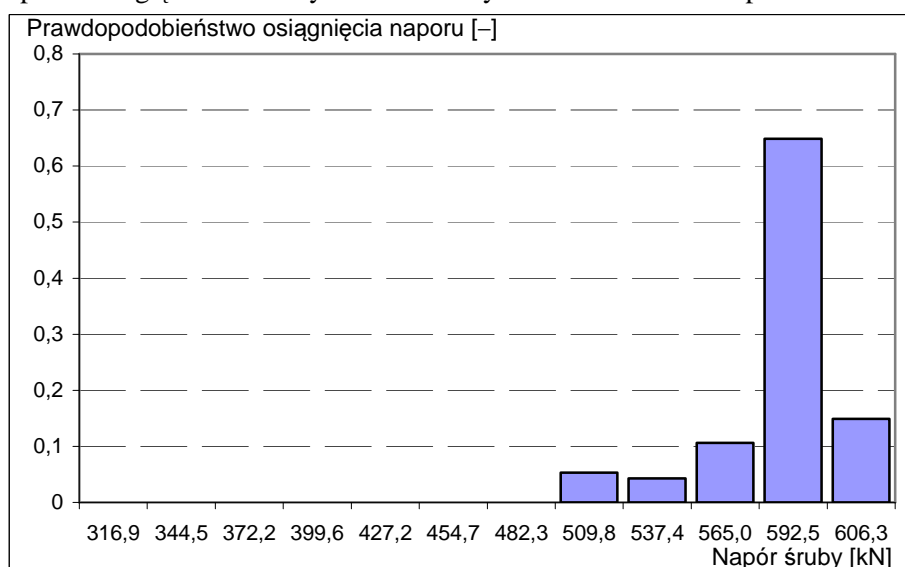
Podczas pływania statku po sfalowanej wodzie może wystąpić chwilowe wynurzenie się śruby napędowej (rozdz. 7.1.2). W trakcie wynurzenia następuje chwilowy spadek naporu śruby, co w konsekwencji prowadzi do chwilowego spadku prędkości statku. Wykonane obliczenia „wzorcowe” według algorytmu [98, 104] dla statku K1 pokazują jak zmienia się średni napór i prawdopodobieństwo wystąpienia naporu o określonej wartości na trasie żeglugi [104, 105]. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 11.11. Spadek średniego naporu śruby, w wyniku wynurzenia, dla całej linii żeglugowej jest mały (rys. 11.12), stąd spadek średniej prędkości eksploatacyjnej dla całej linii żeglugowej jest rzędu ułamka procenta (rys. 11.12). Tego rzędu spadek prędkości eksploatacyjnej jest dla wielu badanych statków, ale dla niektórych spadek ten był dużo większy, np. dla statku M1 – rysunki 11.13 i 11.14 (pełne obliczenia zamieszczone są w publikacji [106]). Z przeprowadzonych badań wynika, że dla źle zaprojektowanych statków – ze względu na właściwości morskie dla statków małych, oraz gdy średni-

ca śruby jest zbyt duża w stosunku do jej zanurzenia – może wystąpić w złych warunkach pogodowych częstsze wynurzanie się śruby, a tym samym większy spadek prędkości eksploatacyjnej – nawet rzędu 20%. Dla wielu jednak statków, w celu uproszczenia obliczeń średniej statystycznej prędkości statku transportowego z równań parametrycznych, można pominąć równanie parametryczne opisujące spadek naporu śruby podczas jej wynurzania.

a) Napór bez uwzględniania wynurzenia śruby – średnia wartość naporu $\bar{T} = 595,8$ kN

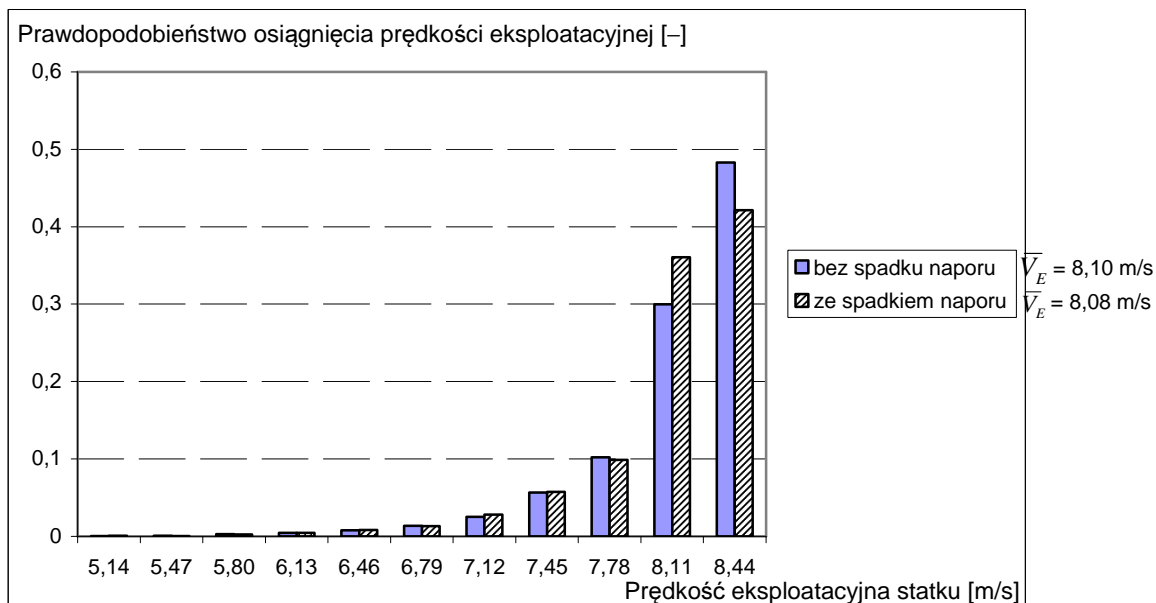


b) Napór z uwzględnieniem wynurzania śruby – średnia wartość naporu $\bar{T} = 588,5$ kN



Rys. 11.11. Histogram naporu śruby napędowej statku K1 na trasie żeglugi Europa Zachodnia–USA (trasa 2 b)

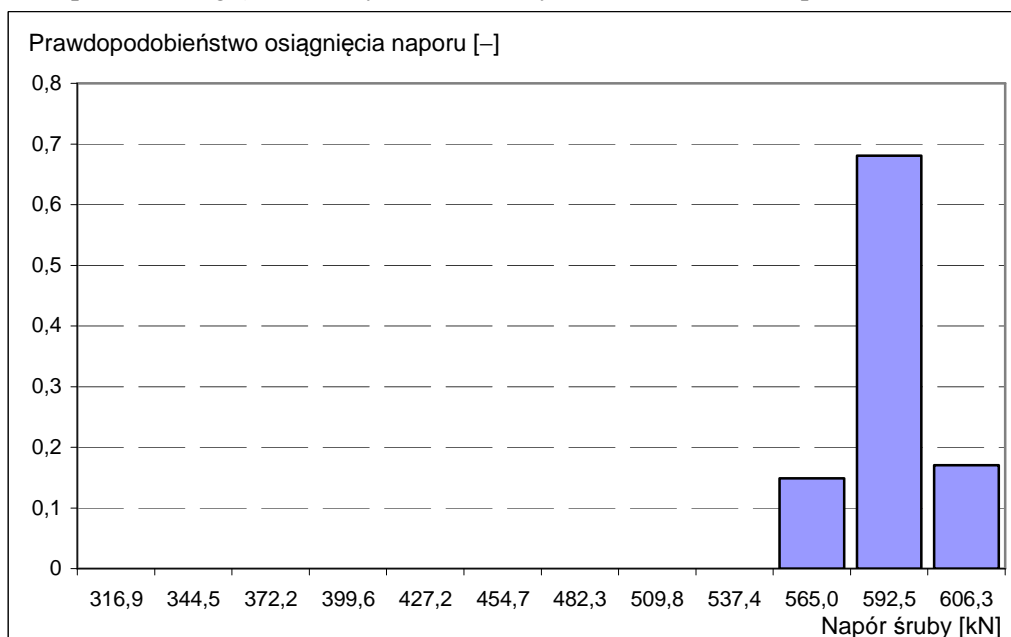
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11.12. Histogram prawdopodobieństwa osiągnięcia prędkości eksploatacyjnej statku K1 z uwzględnieniem i bez uwzględnienia spadku naporu śruby od kołysań statku na trasie 2 b (spadek prędkości \bar{V}_E w wyniku wynurzenia się śruby wynosi około 0,25%)

Źródło: opracowanie własne.

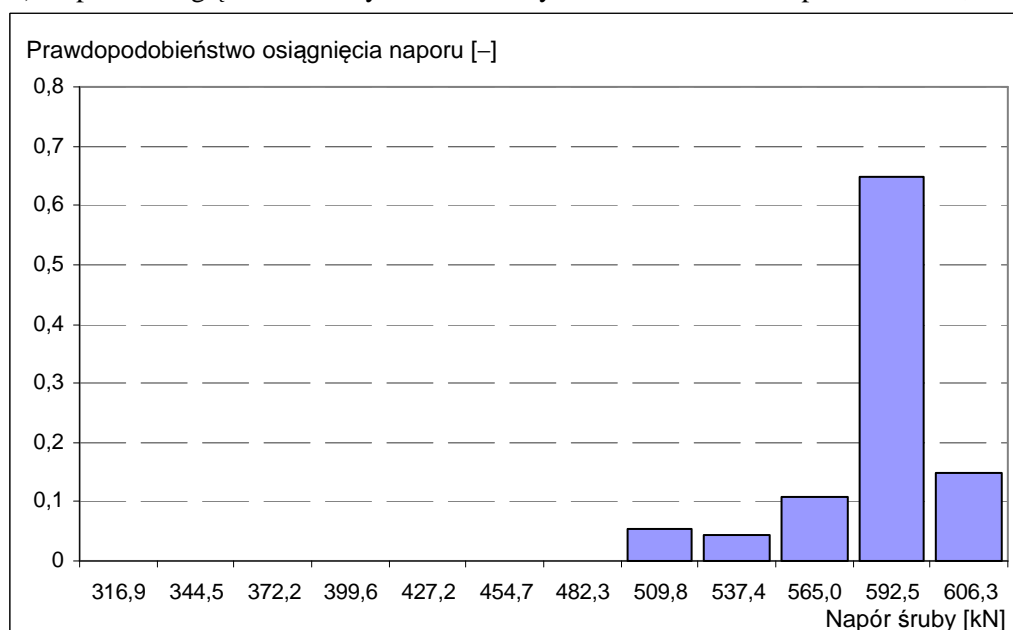
a) Napór bez uwzględniania wynurzenia śruby – średnia wartość naporu $\bar{T} = 532,8 \text{ kN}$



Rys. 11.13. Histogram naporu śruby napędowej statku M1 na trasie żeglugi Europa Zachodnia–USA (trasa 2 b)

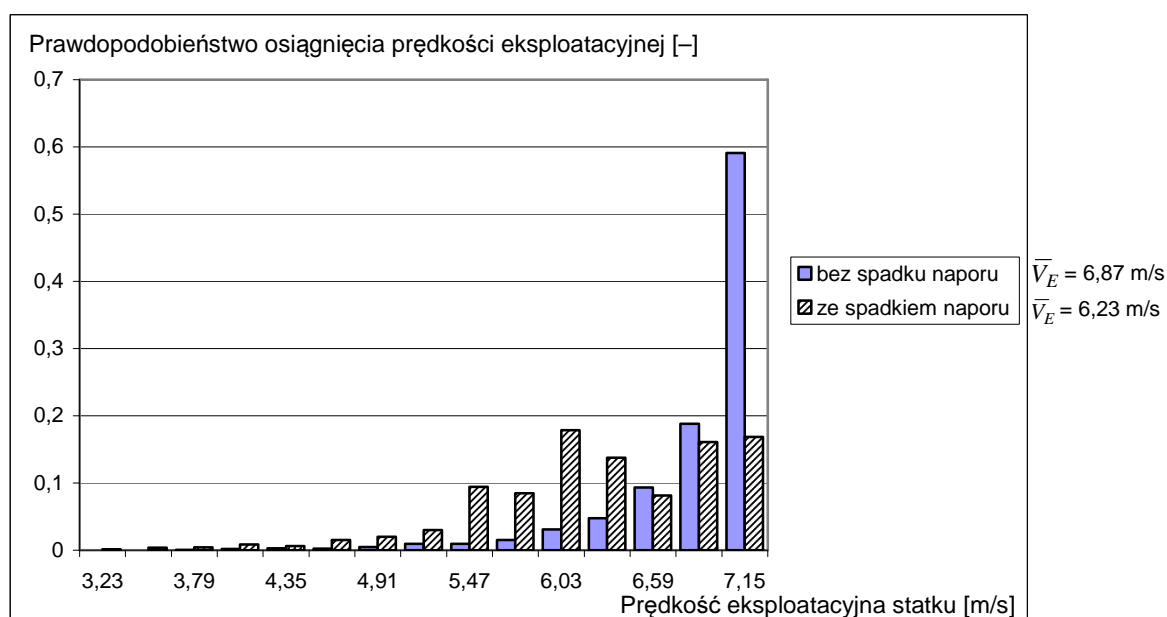
Źródło: opracowanie własne.

b) Napór z uwzględnieniem wynurzenia śruby – średnia wartość naporu $\bar{T} = 519,2$ kN



Rys. 11.13. Histogram naporu śruby napędowej statku M1 na trasie żeglugi Europa Zachodnia–USA (trasa 2 b) (cd.)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11.14. Histogram prawdopodobieństwa osiągnięcia prędkości eksploatacyjnej statku M1 z uwzględnieniem i bez uwzględnienia spadku naporu śruby od kołysań statku na trasie 2 b (spadek prędkości \bar{V}_E w wyniku wynurzenia się śruby wynosi około 9,3%)

Źródło: opracowanie własne.

12. INNE ZASTOSOWANIA OPRACOWANEJ METODY PARAMETRYCZNEJ DO PROGNOZOWANIA ŚREDNIEJ STATYSTYCZNEJ PRĘDKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ STATKU NA ETAPIE PROJEKTOWANIA WSTĘPNEGO

12.1. Wykorzystanie parametrycznego modelu prędkości eksploatacyjnej w projektowaniu statku

Armator, zamawiając statek o określonych parametrach techniczno-eksploatacyjnych (np. nośność i prędkość), ma zawsze na uwadze swoje przyszłe zyski z eksploatacji tego statku na określonej linii żeglugowej. Poziom tych zysków może w dużym stopniu zależeć od właściwego (optymalnego) doboru nośności i prędkości statku w procesie projektowania. Najważniejsze decyzje o parametrach technicznych statku podejmowane są na etapie projektowania wstępnego, w sytuacji gdy jest mała liczba danych geometrycznych dotyczących np. kadłuba statku. Opracowana nowa metodologia projektowania wstępnego statku [1, 2] i optymalizacja jego podstawowych parametrów nośności i prędkości eksploatacyjnej zakłada istnienie parametrycznych modeli nośności i prędkości statku. Model nośności statku już istnieje, a model prędkości tylko dla wody spokojnej (dla prędkości kontraktowej). Natomiast nie istnieje wystarczająco dokładny model prędkości eksploatacyjnej statku transportowego w statystycznych warunkach pogodowych na założonej linii żeglugowej. Opracowany i przedstawiony w tej monografii model parametryczny prędkości eksploatacyjnej może być zastosowany w tym nowym podejściu do optymalizacji nośności i prędkości statku w celu maksymalizacji zysku z eksploatacji statku.

Nowa metoda projektowania [1, 2] bazuje na wyznaczaniu zmiennych decyzyjnych (wymiary statku) bez nakładania ścisłych warunków na nośność i prędkość statku. Zadanie wyznaczenia wymiarów statku polega na poszukiwaniu optymalnych wartości parametrów statku w założonych granicach:

$$\begin{aligned}L_d < L < L_g, \\ B_d < B < B_g, \\ T_d < T < T_g,\end{aligned}\tag{12.1}$$

przy ekstremalizacji funkcji celu: ekonomicznej, technicznej i przy określonych ograniczeniach wynikających np. z przepisów organizacji morskich (np. IMO) lub przepisów towarzystw klasyfikacyjnych.

Jednym z kryteriów zastosowanych w publikacji [1], a służących ocenie ekonomicznej inwestycji (projektowanie i budowa statku), jest wartość bieżąca netto *NPV*:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I, \tag{12.2}$$

w której kluczową rolę odgrywa obliczenie strumieni przepływów pieniężnych CF w danym przedziale czasu:

$$CF_t = FR_t \cdot Q(V_E, P_N) - AAC[P_B(R_C, V_E, \eta_D), L, B, T, H, C_i], \quad (12.3)$$

gdzie:

- FR – stawka frachtowa,
- AAC – roczne koszty eksploatacji,
- P_B – zainstalowana moc napędu statku uwzględniająca warunki pogodowe,
- R_C – całkowity opór kadłuba,
- η_D – sprawność ogólnonapędowa,
- I – koszt inwestycji,
- Q – wydajność transportowa,
- V_E – prędkość eksploatacyjna statku,
- P_N – nośność statku,
- r – stopa dyskontowa,
- L, B, T, H – główne wymiary statku (odpowiednio: długość, szerokość, zanurzenie, wysokość kadłuba),
- C_i – współczynniki geometryczne charakteryzujące kadłub, np. C_B (współczynnik pełnotliwości kadłuba statku).

We wzorze (12.3) występuje zainstalowana moc P_B napędu statku uzależniona od oporu całkowitego R_C i prędkości eksploatacyjnej V_E w statystycznych warunkach pogodowych występujących na danej linii żeglugowej.

W metodzie projektowania statków przedstawionej w publikacji [1] brak jest modelu parametrycznego prędkości eksploatacyjnej V_E i oporu całkowitego R_C . Stąd moc zainstalowanego napędu P_B była zastąpiona wyrażeniem:

$$P_B = k_z k_{SG} \frac{P_E}{\eta_D}, \quad (12.4)$$

gdzie:

- P_E – moc holowania na wodzie spokojnej,
- k_{SG} – sprawność linii wałów i przekładni (o ile jest zastosowana),
- k_z – dodatek żeglugowy:

$$k_z = 1 + \frac{\Delta R \cdot V_K}{P_{B0}}, \quad (12.5)$$

gdzie:

- ΔR – przyrost oporu od warunków pogodowych,
- V_K – prędkość kontraktowa (na wodzie spokojnej),
- P_{B0} – moc napędu na wodzie spokojnej.

Dodatek żeglugowy jest wielkością deterministyczną, może być więc arbitralnie przyjmowany (najczęściej wynosi 15%) i praktycznie nie ma nic wspólnego z rzeczywistymi, losowymi warunkami pogodowymi występującymi na danej linii żeglugowej.

Proponuje się więc zastąpienie w modelu optymalizacyjnym [1] mocy napędu P_B , określonej na podstawie dodatku żeglugowego k_z , przez moc napędu wynikającą z rzeczywistej średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku \bar{V}_E w sezonowych warunkach pogodowych występujących na linii żeglugowej, na którą projektowany jest statek.

Wnioski

Zastosowanie we wstępnym projektowaniu statku nowej metodyki projektowania [1], uzupełnionej o aproksymacyjny model prędkości eksploatacyjnej \bar{V}_E , pozwoli na lepszą optymalizację statku, którego parametry projektowe będą bardziej dostosowane do aktualnej sytuacji rynkowej w transporcie morskim.

12.2. Prognozowanie innych parametrów eksploatacyjnych statku transportowego

Podczas pływania statku w statystycznych warunkach pogodowych, szczególnie przy oddziaływaniu falowania, za pomocą przedstawionej metody i modelu parametrycznego prędkości eksploatacyjnej można prognozować (w sensie statystycznym długoterminowym) różne inne parametry eksploatacyjne statku związane z:

- pracą układu napędowego – zużycie paliwa, zużycie silnika napędowego (na podstawie prawdopodobieństwa obciążenia silnika – moc, prędkość obrotowa);
- obciążeniami kadłuba statku na fali i naprężeniami zmęczeniowymi;
- obciążeniami wyposażenia statku i naprężeniami zmęczeniowymi;
- określeniem prawdopodobieństwa, np. zrywania się kontenerów podczas przyspieszeń i powstających sił masowych od intensywnego falowania.

Przedstawiona metoda prognozowania prędkości eksploatacyjnej, po pewnych modyfikacjach, pozwala na prognozowanie powyższych wielkości już na etapie projektowania wstępnego statku.

Prognozowanie pracy silnika napędowego

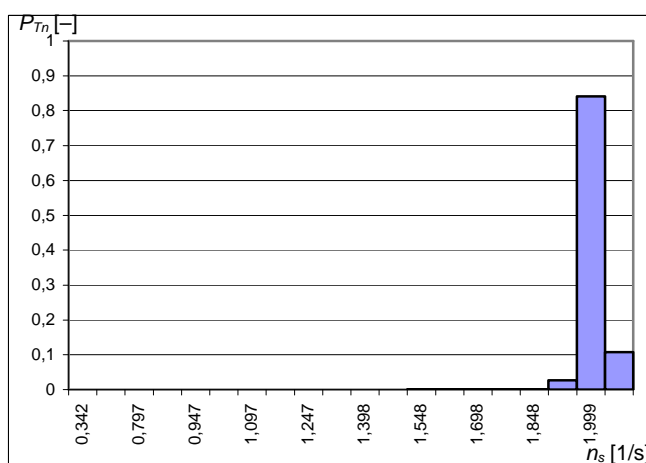
Podczas obliczania chwilowych wartości prędkości eksploatacyjnej statku w zmiennych warunkach pogodowych – rozwiązywanie układów równań (10.1) i (10.2) – poszukuje się prędkości odpowiadającej punktowi leżącemu w polu pracy silnika napędowego (rys. 7.9). Punkt pracy określony jest przez chwilową moc oraz prędkość obrotową. Dla tego punktu może być przypisane jednostkowe zużycie paliwa. Wykorzystując obliczenia, zgodnie z algorytmem zamieszczonym w rozdziale 10.3, można obliczyć histogramy i średnią statystyczną:

- mocy silnika napędowego,
- prędkości obrotowej silnika napędowego,
- jednostkowego zużycia paliwa,
- punktu pracy silnika napędowego.

Wstępne, przykładowe wyniki takich badań przedstawione są na rysunkach 12.1–12.3 z publikacji [107]. Wyniki te otrzymane zostały dla statku, dla którego w procesie projektowania założono dodatek żeglugowy (rys. 2.1) o wartości $SM = 15\%$ oraz $SM = 25\%$.

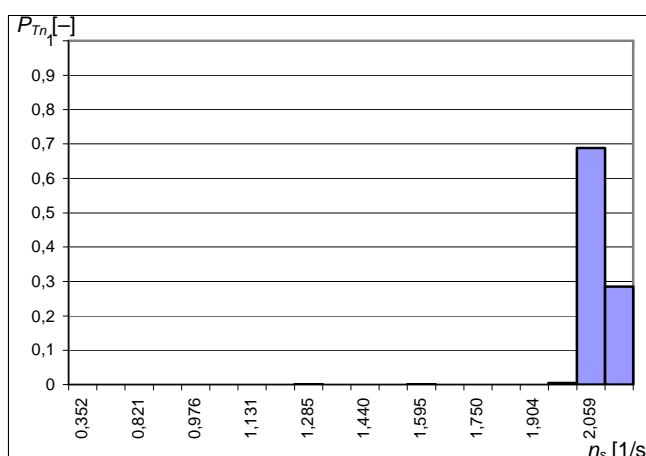
Na rysunkach 12.1 i 12.2 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci histogramów oraz średniej statystycznej wartości mocy i prędkości obrotowej silnika napędowego, a także jednostkowego zużycia paliwa podczas rejsu na zadanej linii żeglugowej w statystycznych warunkach pogodowych. Widoczne są tu różnice pomiędzy wartościami statystycznymi mocy, prędkości obrotowej i jednostkowego zużycia paliwa przy różnych, przyjętych podczas projektowania, dodatkach żeglugowych SM . Dla dodatku żeglugowego o wartości $SM = 25\%$ średnia prędkość statystyczna na danej linii żeglugowej będzie większa niż dla $SM = 15\%$, ale jednocześnie średnie statystyczne jednostkowe zużycie paliwa przy $SM = 25\%$ jest większe (rys. 12.2).

Histogramy prędkości obrotowej silnika napędowego
 $SM = 15\%$



Nominalna prędkość obrotowa $n_n = 2,030$ [1/s], średnia prędkość obrotowa $\bar{n}_s = 2,021$ [1/s]

$SM = 25\%$

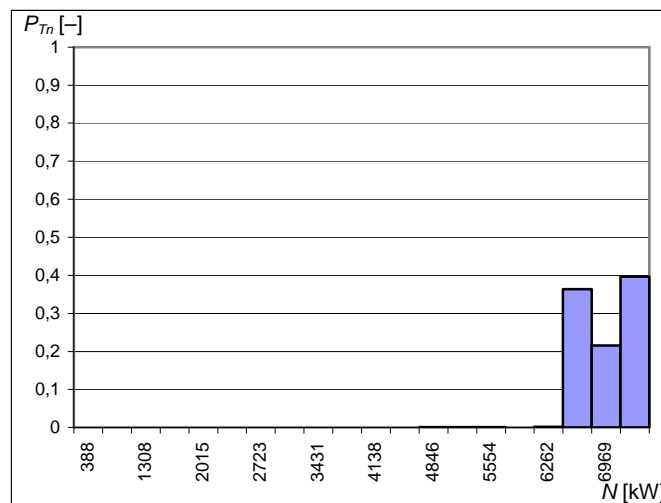


Nominalna prędkość obrotowa $n_n = 2,092$ [1/s], średnia prędkość obrotowa $\bar{n}_s = 2,070$ [1/s]

Rys. 12.1. Histogramy i średnie statystyczne wartości prędkości obrotowej i mocy silnika napędowego statku M2 oraz trasy żeglugowej 2 b przy różnych dodatkach żeglugowych SM ($SM = 15\%$ i 25%)

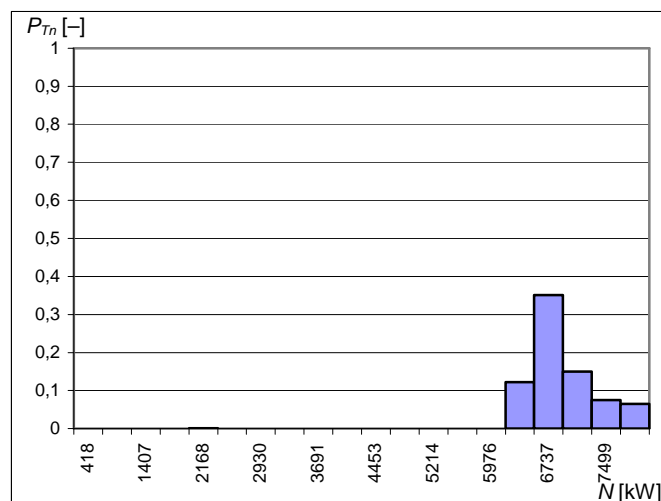
Źródło: opracowanie własne.

Histogramy dla mocy silnika napędowego
SM = 15%



Moc nominalna $N_n = 7500$ [kW], średnia moc $\bar{N} = 6970$ [kW]

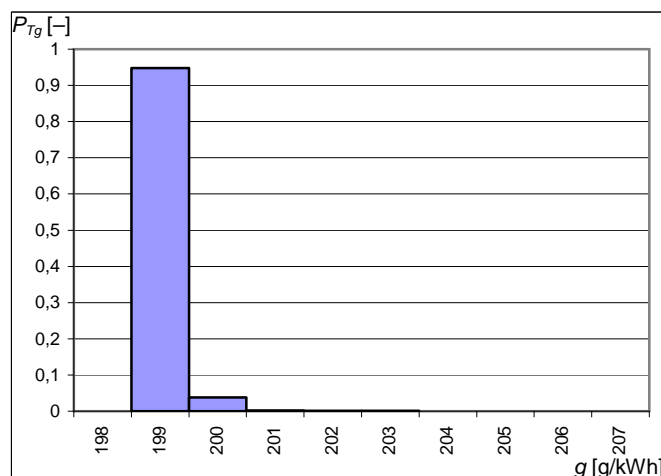
SM = 25%



Moc nominalna $N_n = 8070$ [kW], średnia moc $\bar{N} = 7123$ [kW]

Rys. 12.1. Histogramy i średnie statystyczne wartości prędkości obrotowej i mocy silnika napędowego statku M2 oraz trasy żeglugowej 2 b przy różnych dodatkach żeglugowych SM (SM = 15% i 25%) – (cd.)

Histogramy dla jednostkowego zużycia paliwa
SM = 15%

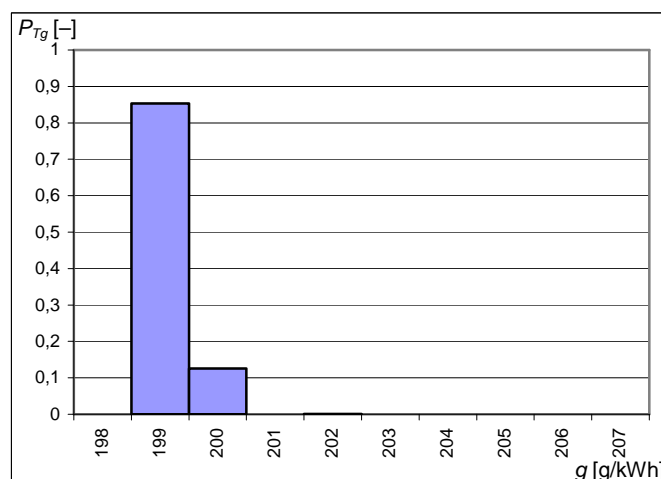


Średnie zużycie paliwa = 199,01 g/kWh

Średnie, jednostkowe zużycie paliwa na wodzie spokojnej $g = 199,00$ g/kWh

Zadana prędkość eksploatacyjna = 7,72 [m/s]

SM = 25%



Średnie zużycie paliwa = 199,13 g/kWh

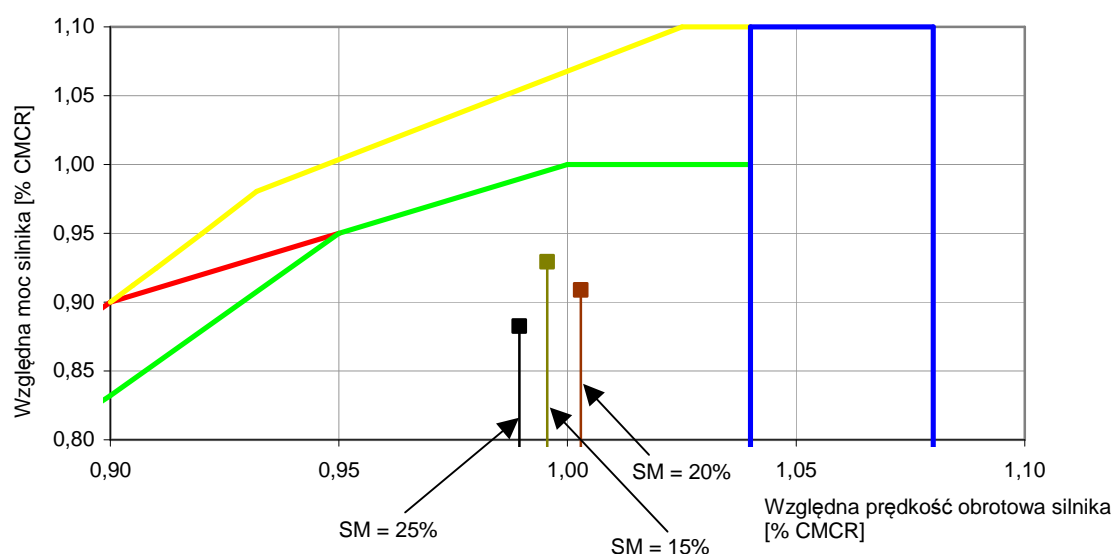
Średnie, jednostkowe zużycie paliwa na wodzie spokojnej $g = 199,00$ g/kWh

Zadana prędkość eksploatacyjna = 7,72 [m/s]

Rys. 12.2. Histogramy i średnie statystyczne jednostkowe zużycie paliwa dla statku M2 i linii żeglugowej 2 b przy różnych dodatkach żeglugowych SM (SM = 15% i 25%)

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 12.3 pokazano fragment pola pracy silnika napędowego statku M2 (baza B), na którym zaznaczono położenia średniego statystycznego punktu pracy obliczonego dla różnych wartości dodatku żeglugowego SM = 15%, 20% i 25%. Średni statystyczny punkt pracy pokazuje jakie wartości parametrów silnika (moc, prędkość obrotowa, także temperatura, zużycie paliwa itp.) wystąpiły podczas rejsu statku na zdanej linii żeglugowej. Na podstawie tych parametrów można prognozować stopień zużycia silnika i przewidywać termin jego remontu.



Rys. 12.3. Średni statystyczny punkt pracy silnika napędowego statku M2 na linii żeglugowej 2 b przy różnych założonych dodatkach żeglugowych SM (SM = 15%, 20%, 25%)

Źródło: opracowanie własne.

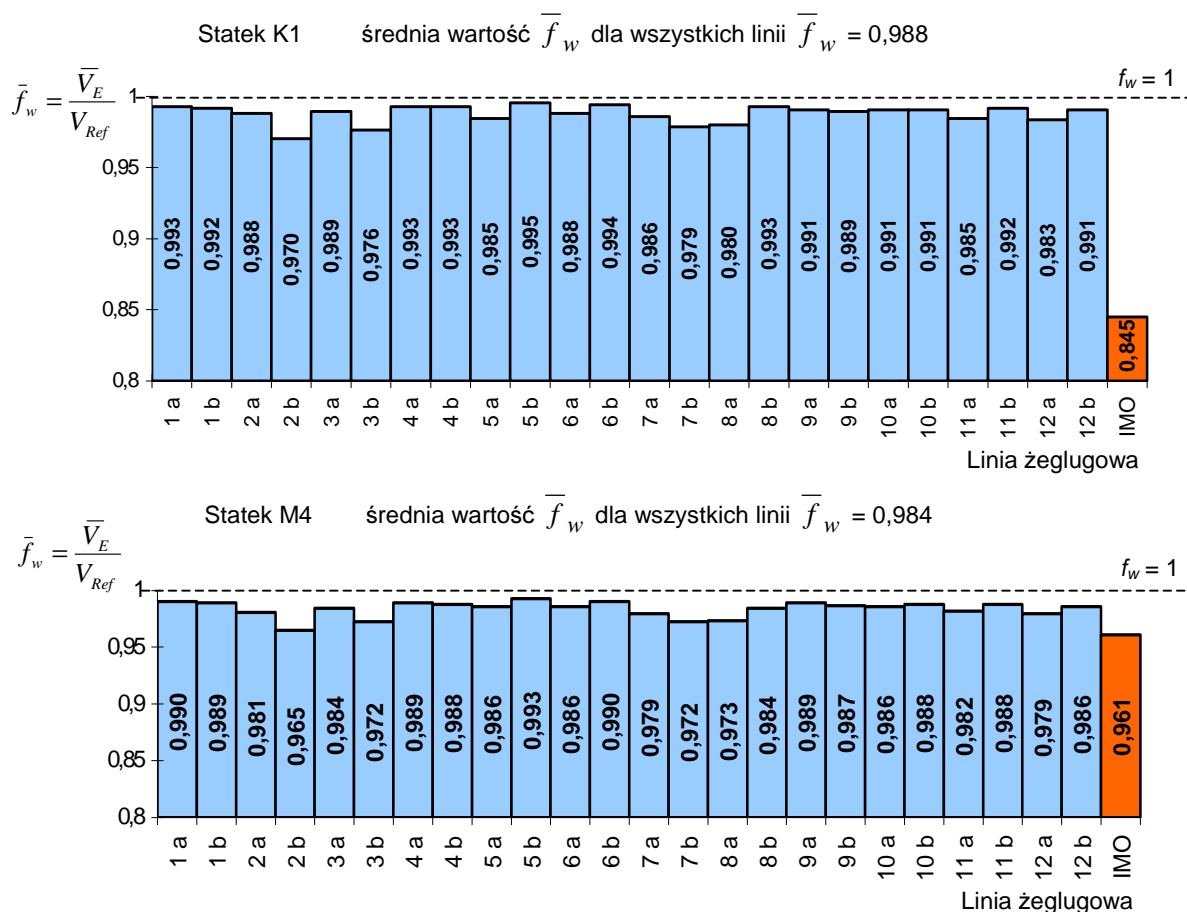
12.3. Zastosowanie modelu parametrycznego w analizie efektywności energetycznej statku (wskaźnik EEDI)

Jednym z warunków dopuszczenia, od 2013 roku, do eksploatacji nowego lub przebudowanego statku transportowego jest osiągnięcie wskaźnika EEDI (rozdz. 1.3.2) o wartości mniejszej od dopuszczalnej. W aktualnej postaci tego wskaźnika jego wartość zależy m.in. od prędkości statku na wodzie spokojnej (może to być prędkość kontraktowa) oraz od spadku tej prędkości podczas pływania statku w rzeczywistych warunkach pogodowych. Sposób obliczania spadku prędkości budzi różne wątpliwości i kontrowersje, co powoduje, że trwają dalsze prace nad postacią wzoru na obliczanie wartości wskaźnika EEDI. Zaproponowana metoda pozwala na bardzo dokładne oszacowanie (w sensie statystycznym, długoterminowym) spadku prędkości już na etapie projektowania wstępnego. Pomimo że wskaźnik EEDI jeszcze tego nie zawiera, pokazana metoda pozwala określić jak właściwa eksploatacja statku w rzeczywistych warunkach pogodowych może przyczynić się do obniżenia emisji spalin w tym i CO₂ [109–111, 114, 115].

We wzorze na EEDI (1.16) występuje parametr f_w , zdefiniowany jako bezwymiarowy współczynnik określający spadek prędkości statku pod wpływem warunków pogodowych. Wstępnie Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) zaleca, aby wartość tego współczynnika przyjmować $f_w = 0,9$. Rzeczywista wartość tego współczynnika zależy, z jednej strony, od jakości projektu statku, a z drugiej – od jego eksploatacji w rzeczywistych warunkach pogodowych występujących na zadanej trasie żeglugi.

Za pomocą modelu matematycznego obliczania średniej statystycznej prędkości eksploatacyjnej statku, przedstawionego w rozdziałach 5. i 7. (tzw. obliczenia wzorcowe), wyznaczono

dla statku K1 i M4 (baza B) średnią statystyczną wartość współczynnika f_w dla różnych linii żeglugowych – rysunek 12.4 (pełna informacja dotycząca tych obliczeń zawarta jest w publikacji [109]). Wykorzystując w tych obliczeniach model parametryczny (rozdz. 6 i 8) można już na etapie projektowania wstępnego obliczyć wartość współczynnika f_w .



Rys. 12.4. Współczynnik \bar{f}_w dla kontenerowca K1 i masowca M4 oraz wybranych linii żeglugowych
Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione wyniki obliczeń współczynnika \bar{f}_w dla przykładowych statków K1 i M4 (baza B) o różnych wypornościach i dla różnych tras żeglugowych pokazują, że:

- współczynnik f_w , a tym samym i EEDI, zależą od trasy żeglugi i warunków pogodowych na niej występujących;
- średnia wartość współczynnika \bar{f}_w dla wszystkich linii żeglugowych, dla danego statku ma wartość większą niż \bar{f}_w , obliczoną według zaleceń IMO [49]; nawet tak mała różnica (rys. 12.4) może decydować o tym czy EEDI dla danego statku będzie miał wartość mniejszą od linii referencyjnej i czy statek uzyska certyfikat efektywności energetycznej;
- zaproponowana metoda obliczania f_w umożliwia optymalizację trasy żeglugi i parametrów pracy układu napędowego statku tak, aby maksymalnie obniżyć emisję CO₂.

12.4. Zastosowanie modelu parametrycznego prędkości eksploatacyjnej w optymalizacji trasy żeglugi statku transportowego

12.4.1. Wstęp – uwagi o optymalizacji trasy żeglugi statku

Wybór optymalnej trasy żeglugi jest jednym z najważniejszych zadań podczas eksploatacji statku transportowego. Przy wyborze optymalnej trasy bierze się pod uwagę jedno lub więcej kryteriów w postaci:

- minimalnego czasu podróży,
- minimalnego zużycia paliwa dla określonego czasu podróży,
- bezpieczeństwa statku i ładunku,
- komfortu pasażerów podczas podróży.

Ostatnie kryterium w zasadzie jest stosowane na statkach wycieczkowych i nie dotyczy statków transportowych.

Minimalny czas podróży może być osiągnięty przy minimalnej długości trasy rejsu i/lub maksymalizacji prędkości statku.

Minimalne zużycie paliwa może być osiągnięte przez minimalizację długości trasy rejsu i/lub utrzymania optymalnych parametrów pracy silnika napędowego – w warunkach wody spokojnej (bez wiatru i falowania) – jest to punkt pracy silnika napędowego odpowiadający jednej prędkości statku [81]. Przy pływaniu na fali poszukiwanie minimalnego zużycia paliwa (i wynikającej z tych warunków pogodowych prędkości) może się wiązać ze zmianą kursu, co powoduje zmianę długości trasy i wydłużenia czasu rejsu [81].

Bezpieczeństwo statku i ładunku wiąże się z negatywnymi efektami oddziaływania wiatru i falowania na statek (kołysania, przyspieszenia, sleming, zalewanie pokładu, wynurzenie się śruby – rozdz. 9). Ograniczenie poziomu skutków tych oddziaływań, podczas eksploatacji statku, wiąże się z redukcją prędkości i/lub zmianą kursu statku. Oba te manewry będą skutkowały wydłużeniem długości trasy oraz czasu żeglugi, co może także zwiększyć zużycie paliwa.

Wybór optymalnej trasy żeglugi jest więc zadaniem złożonym i mimo stosowania różnych metod [48, 79] nie ma pewności, że wybrana trasa będzie optymalna. Powodem tego może być m.in. fakt, że średnie statystyczne parametry falowania i wiatru są zmiennymi losowymi zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. W trakcie trwania rejsu średnie statystyczne parametry pogodowe zmieniają się i zaplanowana trasa żeglugi na początku rejsu, dla chwilowych wartości parametrów pogodowych, nie musi być optymalna po dojściu do portu docelowego. Z tych też powodów częściej używa się bardziej poprawnego określenia – prognozowanie trasy żeglugi – niż optymalizacja trasy żeglugi.

12.4.2. Podstawowe podejście przy wyborze trasy żeglugi

Poszukiwanie „optymalnej” trasy żeglugi statku sprowadza się do dwóch etapów:

1. opracowania matematycznego modelu opisu ruchu statku w środowisku morskim,
2. wyznaczenie „optymalnej” trasy statku.

Wyznaczenie „optymalnej” trasy statku polega na zastosowaniu odpowiedniego algorytmu wykorzystującego model matematyczny ruchu statku przy wykorzystaniu jednego lub kilku kryteriów, według których dokonuje się wyboru optymalnej trasy. Zagadnienie to było przedstawione w wielu publikacjach [79, 81, 82].

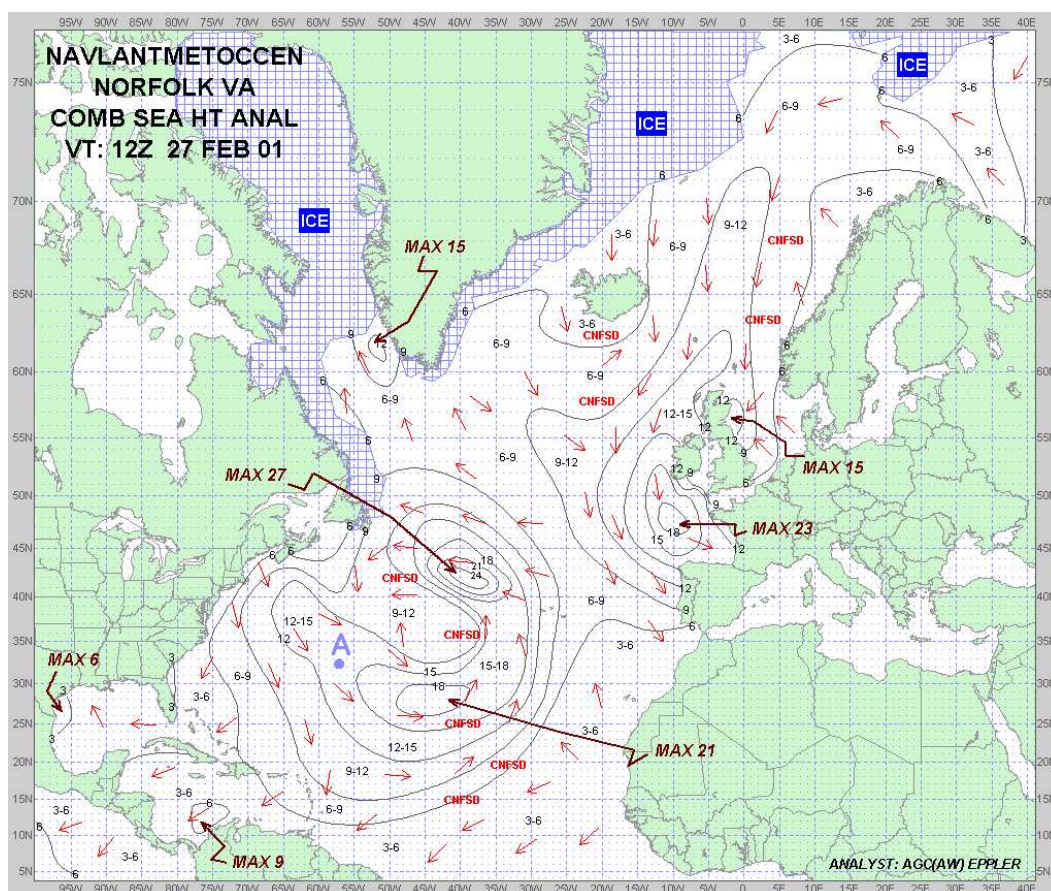
Matematyczny opis ruchu statku może być przedstawiony w postaci różniczkowych równań ruchu, zawierających pełną dynamikę statku (siły bezwładności, tłumiące), model układu napędowo-sterowego (śruba i silnik napędowy oraz ster płetwowy) i model sił wymuszających (od wiatru, fali, powierzchniowych prądów morskich). W zależności od przyjętego modelu sił wymuszających, np. od fali, model ruchu statku jest mniej lub bardziej skomplikowany, co ma wpływ na metodę rozwiązywania tego modelu i wykorzystania go w algorytmie poszukiwania optymalnej trasy żeglugi. Trudności spowodowane wykorzystaniem złożonego, ale jednocześnie dokładnego modelu ruchu statku w optymalizacji trasy żeglugi, spowodowały, że powszechnie stosowane są tzw. charakterystyki prędkościowe statku. Charakterystyki te to możliwie proste zależności pomiędzy prędkością statku a podstawowymi parametrami statku i średnimi statystycznymi parametrami falowania, wiatru oraz prądów powierzchniowych. Zależności te są przedstawione w postaci nomogramów lub prostych zależności, opracowanych na podstawie pomiarów lub obliczeń wykonanych dla wielu statków. W zależnościach tych często parametry, np. geometryczne statku, zastępuje się jednym lub dwoma współczynnikami liczbowymi, mającymi charakteryzować dany statek. Z tych charakterystyk prędkościowych oblicza się dla danego statku i zadanych średnich statystycznych parametrów pogodowych prędkość statku w tych warunkach, a dokładnie spadek prędkości w wyniku dodatkowego oporu w stosunku do prędkości na wodzie spokojnej (czyli bez wiatru i falowania).

Na fali, oprócz spadku prędkości, powstają także niebezpieczne zjawiska (kołysania, przyspieszenia, sleming itp.), które przy zbyt dużym natężeniu mogą zagrozić bezpieczeństwu statku i ładunku. Aby ograniczyć te zagrożenia, można celowo zredukować prędkość statku (tzw. sztormowy spadek prędkości) i/lub zmienić kurs statku. Także i te zjawiska są przedstawiane w postaci prostych, uniwersalnych nomogramów. Takie bardzo proste zależności opisujące charakterystyki prędkościowe statku nie są zbyt dokładne. Zastosowanie opracowanego parametrycznego modelu obliczania całkowitego oporu i prędkości eksploatacyjnej statku w rzeczywistych warunkach pogodowych pozwoli na dużo dokładniejsze prognozowanie trasy żeglugi statku. W artykułach [74, 75, 91] zaprezentowano metodę obliczania chwilowych prędkości statku w zadanych warunkach pogodowych, korzystając z równań zamieszczonych w rozdziałach 6. i 8. Prowadzone są badania nad zastąpieniem modelu dokładnego jego postacią parametryczną. Ponieważ dokładność modelu parametrycznego jest dostatecznie duża (rozdz. 11.4) można przypuszczać, że dokładność prognozowania trasy żeglugi będzie wystarczająco dobra.

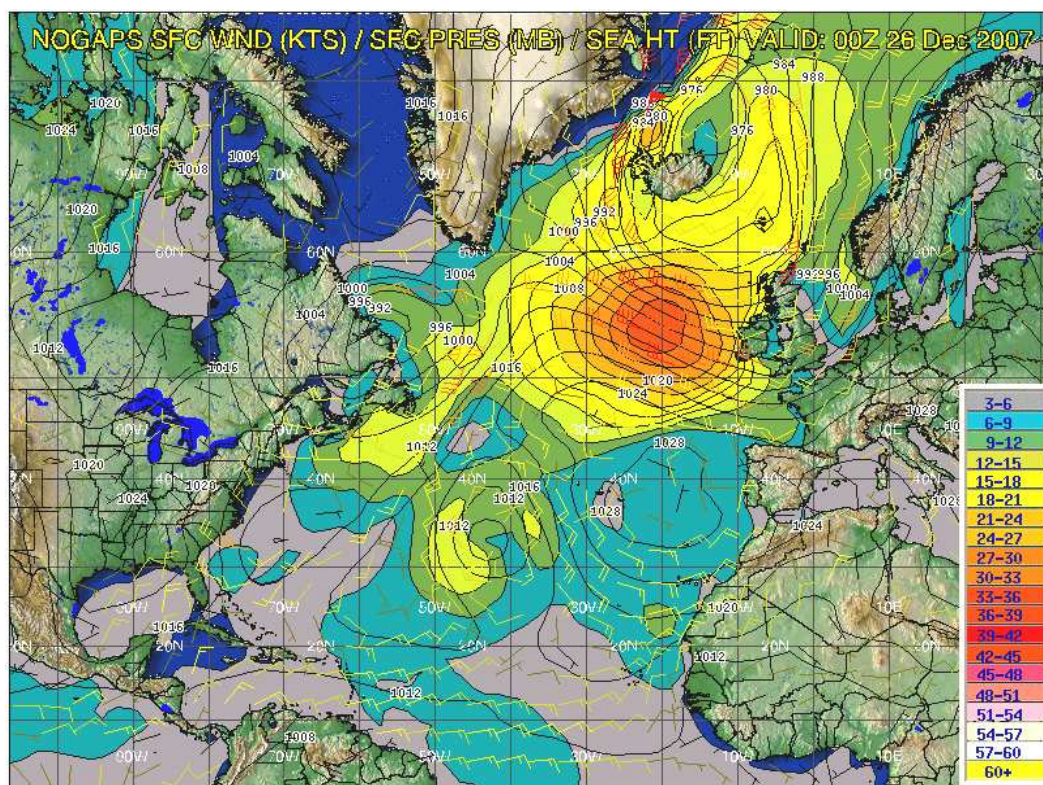
12.4.3. Zastosowanie opracowanego modelu prędkości eksploatacyjnej do prognozowania trasy żeglugi statku

Podstawowym zadaniem (procedurą) w procesie prognozowania trasy żeglugi statku (niezależnie od przyjętego kryterium) jest obliczenie chwilowej prędkości statku w zadanych warunkach pogodowych. W tym zadaniu parametry warunków pogodowych nie są średnimi, statystycznymi długoterminowymi, jak zostało to przedstawione w rozdziale 4., ale chwilowe średnie statystyczne parametry pogodowe (wiatr i falowanie) otrzymane z krótkoterminowych (np. 4-godzinnych) serwisów pogodowych, tzw. mapy faksymilowe (rys. 12.5 i 12.6).

Na podstawie danych z map, z różniczkowych równań ruchu statku wyznacza się chwilową prędkość statku. Równania ruchu mogą zawierać pełny model oddziaływań wiatru, falowania i prądów morskich (przedstawiony w rozdz. 5. i 7. – statek jest zbudowany i istnieje dokumentacja ze wszystkimi parametrami) lub też można wykorzystać model parametryczny przedstawiony w rozdziałach 6. i 8. Model parametryczny jest wystarczająco dokładny do tego zadania, a jednocześnie pozwala na prowadzenie symulacji ruchu w czasie rzeczywistym, co jest bardzo istotne na statku, na którym nie instaluje się wydajnych komputerów o wysokiej mocy obliczeniowej. Opracowany model parametryczny nadaje się więc do tego zadania.



Rys. 12.5. Mapy faksymilowe – falowanie
Źródło: [123].



Rys. 12.6. Mapy faksymilowe – wiatr
Źródło: [123].

12.4.4. Eksperymentalny program komputerowy PRESTAT

Na podstawie modelu matematycznego prędkości eksploatacyjnej statku opracowano program komputerowy przedstawiony w publikacji [75]. Program komputerowy do obliczeń prędkości statku PRESTAT w zadanych warunkach pogodowych został napisany w języku Delphi i uruchomiony w środowisku Windows. Program ten jest przeznaczony do badań naukowych nad optymalizacją trasy żeglugi statku i oprócz prędkości statku oblicza także inne parametry takie jak: moc i prędkość obrotową silnika napędowego oraz prędkość obrotową śruby (jeśli na statku nie ma przekładni, to prędkość obrotowa silnika = prędkość obrotowa śruby), siły działające na statek od środowiska morskiego, wartości parametrów właściwości morskich. Wszystkie te wielkości wyświetlane są na ekranie komputera (rys. 12.7).

Dane do programu

Dane do programu wprowadzane są w dwóch formach:

1. w postaci pliku wsadowego zawierającego wszystkie wielkości geometryczne statku oraz niezbędne charakterystyki dotyczące: współczynników oporu na wodzie spokojnej, współczynników oporu aerodynamicznego, współczynników falowej siły dryfu oraz charakterystyki śruby i silnika napędowego;

2. w postaci danych wprowadzanych z klawiatury bezpośrednio do interfejsu użytkownika.

Dane wprowadzane z klawiatury dotyczą głównie parametrów pogodowych, parametrów ruchu statku i wyboru reżimu pracy silnika napędowego.

Zadane parametry pogodowe:

– Fala:

 $H_S = \dots$ [m] – znacząca wysokość 0,0–20,0 m, $T_I = \dots$ [s] – okres 0,0–30,0 s, $\mu = \dots$ [deg] – kierunek geograficzny 0–360°, $\mu = 0^\circ$ fala północna, $\mu = 90^\circ$ fala wschodnia.

– Wiatr:

 $V_A = \dots$ [m/s] – średnia prędkość 0,0–50,0 m/s, $\gamma_A = \dots$ [deg] – kierunek geograficzny 0–360°, $\gamma_A = 0^\circ$ wiatr północny, $\gamma_A = 90^\circ$ wiatr wschodni.

– Prąd powierzchniowy:

 $V_C = \dots$ [m/s] – średnia prędkość 0,0–2,0 m/s, $\gamma_C = \dots$ [deg] – kierunek geograficzny 0–360°, $\gamma_C = 0^\circ$ prąd płynie w kierunku północnym, $\gamma_C = 90^\circ$ prąd płynie w kierunku wschodnim.

Stan pracy silnika napędowego – silnik pracuje w polu pracy ciągłej lub można dopuścić do przeciążenia lub też dopuścić do pracy chwilowej.

Zadany kurs statku: $\psi = \dots$ [deg] (0–360°), $\psi = 0^\circ$ – kurs północny, $\psi = 90^\circ$ – kurs wschodni.

Po wprowadzeniu i zatwierdzeniu powyższych danych oraz wykonaniu obliczeń na ekranie wyświetlane są następujące wyniki:

Parametry fali: H_S – znacząca wysokość [m], T_I – okres [s], μ – kierunek geograficzny [deg].**Parametry wiatru:** V_A – średnia prędkość [m/s], γ_A – kierunek geograficzny [deg].**Parametry prądu:** V_C – średnia prędkość [m/s], γ_C – kierunek geograficzny [deg].**Parametry eksploatacyjne statku:** ψ – zadany kurs statku [deg], V_E – wyliczona chwilowa prędkość eksploatacyjna [węzły], δ_R – kąt wychylenia steru [deg], n_s – prędkość obrotowa silnika [1/s] (zadane suwakiem lub wyliczone), N_S – moc silnika [kW].

Znaczące amplitudy kołysań, przyspieszeń oraz częstości innych zjawisk dla wybranych punktów statku dla V_E , ψ , μ :

 $\phi_{A1/3}$ – znacząca amplituda kołysań bocznych statku dla V_E , ψ , μ [deg], $\theta_{A1/3}$ – znacząca amplituda kiwań statku dla V_E , ψ , μ [deg], a_{AVFP} – składowa przyspieszenia pionowego na pionie dziobowym [m/s²], a_{AVB} – składowa przyspieszenia pionowego w sterówce [m/s²], a_{AHTB} – składowa przyspieszenia poziomego poprzecznego w sterówce [m/s²],

N_{ZP} – częstość zalewania (ile razy na godzinę) dla V_E , ψ , μ [–],

N_{SL} – częstość występowania slemingu dla V_E , ψ , μ [–],

N_{WS} – częstość wynurzania się śruby napędowej dla V_E , ψ , μ [–].

Uwaga: na oddzielnym ekranie mogą być wyświetlane informacje o ewentualnych zagrożeniach bezpieczeństwa statku od falowania.

Siły i momenty zewnętrzne (od środowiska morskiego):

R_{XW} , R_{YW} , M_{ZW} – siły i moment od fali,

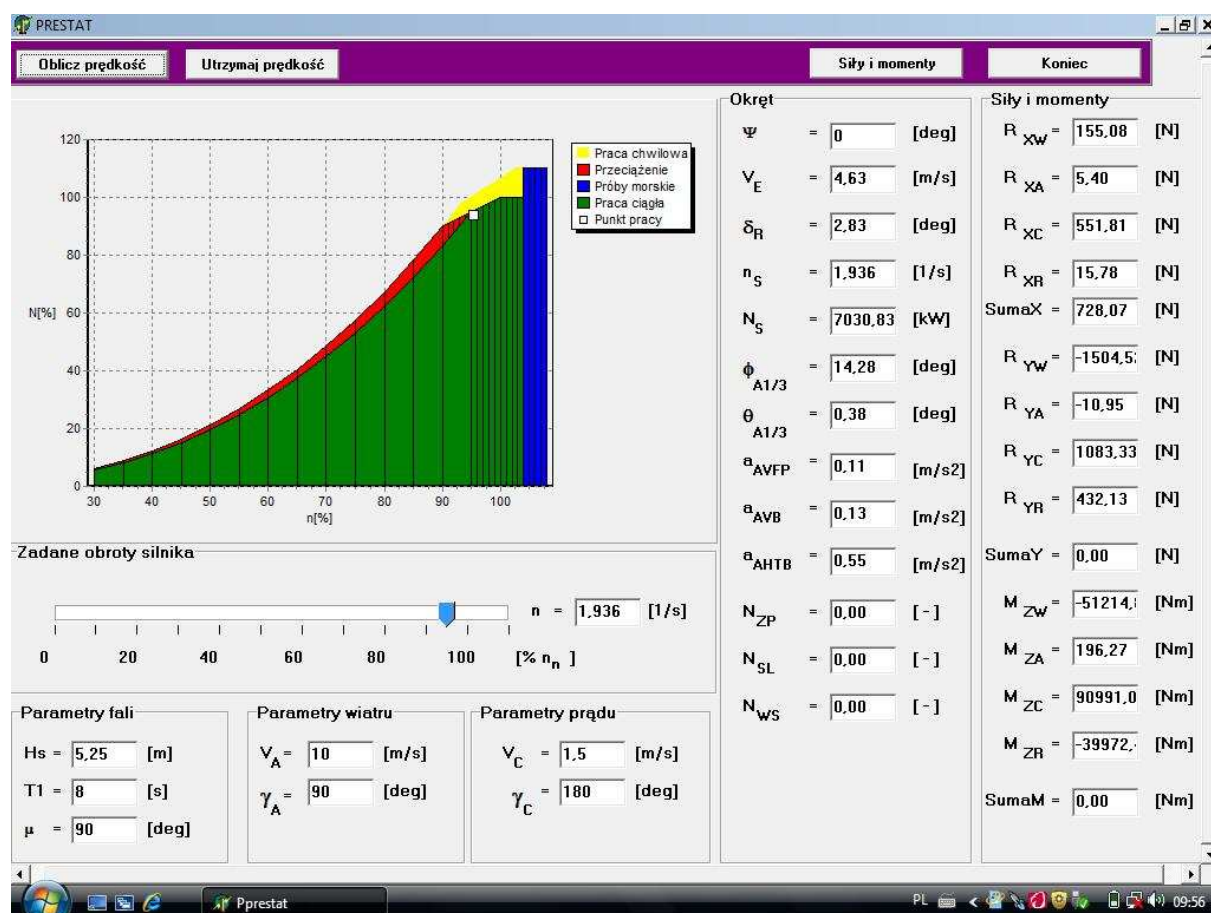
R_{XA} , R_{YA} , M_{ZA} – siły i moment od wiatru,

R_{XC} , R_{YC} , M_{ZC} – siły i moment od wody (ew. z prądem dla $V_C \neq 0$),

R_{XR} , R_{YR} , M_{ZR} – siły i moment od steru.

Z programu PRESTAT otrzymuje się chwilową średnią prędkość eksploatacyjną V_E statku w zadanych, rzeczywistych warunkach pogodowych. Odejmując tę prędkość od prędkości V statku na wodzie spokojnej, otrzymuje się spadek prędkości, który jest używany do prognozowania optymalnej trasy żeglugi statku.

Wprowadzając do programu różne wartości parametrów pogodowych, można badać wpływ tych parametrów na spadek prędkości przy zadanym kursie (jeżeli kurs ma być utrzymywany) lub poszukiwać maksymalnej prędkości V_E (lub minimalnego spadku prędkości) przy zmianie kursu statku.



Rys. 12.7. Wprowadzanie danych z klawiatury i wyniki obliczeń wyświetlane na ekranie w programie PRESTAT

Źródło: opracowanie własne na podstawie programu komputerowego własnego autorstwa.

Program komputerowy został tak skonstruowany, że można obliczać prędkość statku w zadanych warunkach pogodowych przy założeniu różnych scenariuszy pracy silnika napędowego, np. utrzymywanie stałej prędkości obrotowej lub mocy silnika napędowego, stałego jednostkowego zużycia paliwa lub też stałej prędkości statku przy zmieniających się warunkach pogodowych. Na ekranie komputera wyświetlane są też obliczane parametry kołysań statku i innych niebezpiecznych zjawisk (rys. 12.7). Program komputerowy nie dokonuje automatycznie redukcji prędkości statku, gdy przekroczone są dopuszczalne wartości kołysań wywołanych falowaniem (tabela 9.1). Na ich podstawie nawigator może sam celowo zredukować prędkość statku.

12.4.5. Weryfikacja obliczeń spadku prędkości statku

Przykładowe obliczenia wykonano dla masowca o parametrach zawartych w tabeli 12.1 i porównano je z pomiarami dokonanymi na statku podobnym (tabela 12.1) [83].

Tabela 12.1. Parametry statków

Statek	Parametr					
	L [m]	B [m]	T [m]	∇ [m ³]	C_B [–]	V [węzły] ([m/s])
Masowiec M2, dla którego wykonano obliczenia	185,0	25,3	10,6	40831	0,820	14,6 (7,51)
Masowiec serii „Diana”, na którym wykonano pomiary	186,4	30,0	11,46	41260	0,812	14,5 (7,5)

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 12.8 przedstawiono obliczony spadek prędkości masowca M2 przy różnych parametrach oraz kierunkach fali i wiatru względem statku.

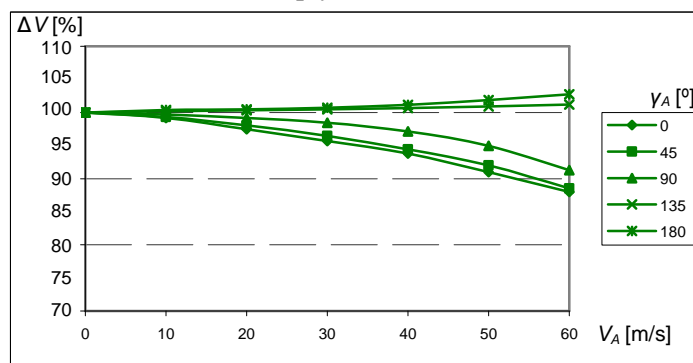
1. Przedstawiony program komputerowy oblicza prędkość statku (lub spadek prędkości) w zadanych warunkach pogodowych i dla zadanego reżimu pracy silnika napędowego i w obecnej wersji służy do badań naukowych nad optymalizacją trasy żeglugi statku.

2. Program wylicza też wartości kołysań i innych zjawisk pochodnych od kołysań z uwzględnieniem dopuszczalnych kryteriów. Ewentualna redukcja prędkości statku przy przekraczaniu tych kryteriów może być dokonana przez nawigatora.

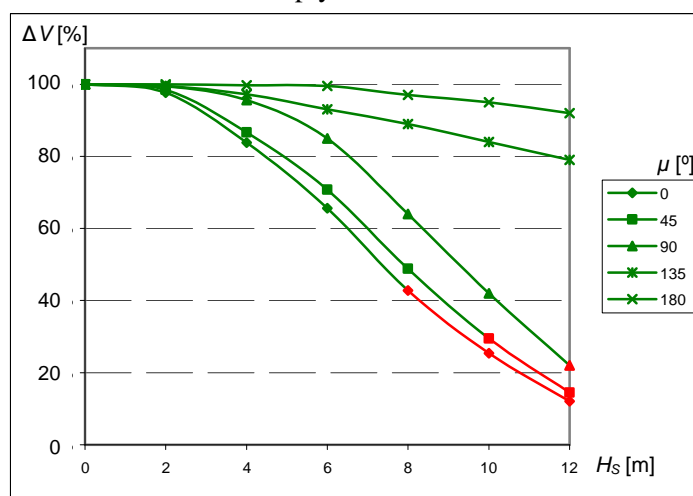
3. Do oceny uzyskanych wyników obliczeń wykorzystano pomiary i obserwacje dokonane na podobnym statku typu „Diana” [83]. Wyniki obserwacji ze statku „Diana” różnią się od obliczeń nie tylko dlatego, że nie jest to dokładnie ten sam statek, ale również dlatego, że:

- obserwacje dokonane na statku „Diana” są uśrednione z czterech godzin,
- parametry wiatru i fali są określane w sposób bardzo przybliżony,
- spadek prędkości uwzględnia już celową redukcję wynikającą z nadmiernych kołysań,
- brak jest informacji o prędkości obrotowej silnika napędowego, dawce paliwa lub gdzie leżał punkt pracy na polu obciążenia silnika.

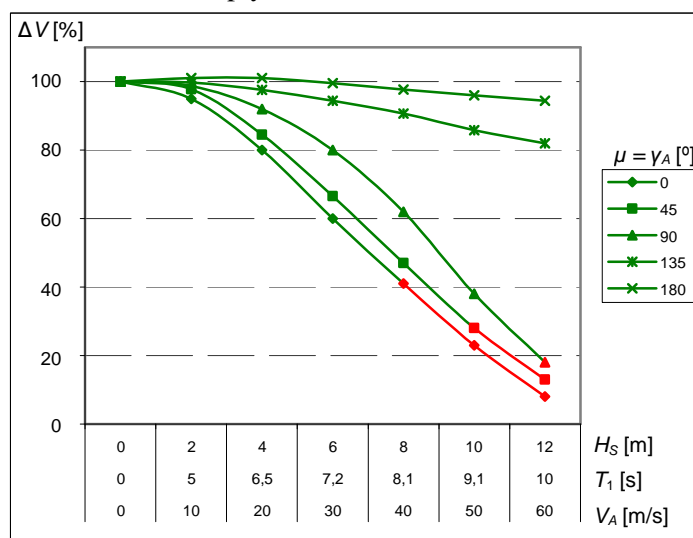
Masowiec M2 $L=185,0$ m
wpływ wiatru



wpływ falowania



wpływ wiatru i falowania



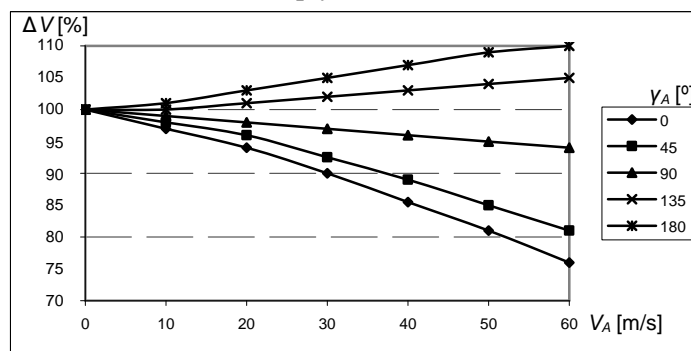
(kolor zielony – praca ciągła bez przeciążenia; kolor czerwony – przeciążenie silnika, rys. 7.9)

Rys. 12.8. Spadek prędkości przy różnych parametrach oraz kierunkach fali i wiatru dla kursu statku $\psi = 0^\circ$

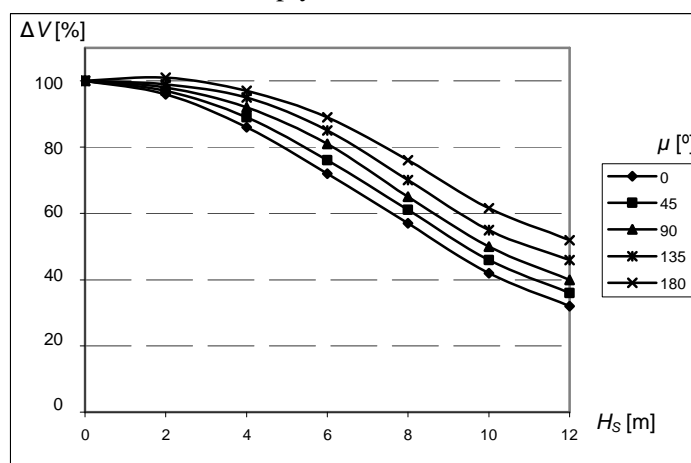
Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w programie PRESTAT oraz danych z publikacji [83].

Masowiec serii „Diana” $L = 186,0$ m

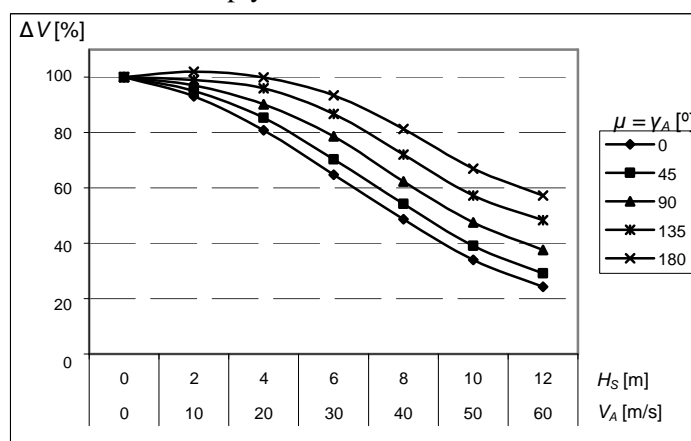
wpływ wiatru



wpływ falowania



wpływ wiatru i falowania



Rys. 12.8. Spadek prędkości przy różnych parametrach oraz kierunkach fali i wiatru dla kursu statku $\psi = 0^\circ$ (cd.)

4. Przedstawione na rysunku 12.8 obliczenia spadku prędkości statku M2 wykonane zostały eksperymentalnym programem PRESTAT, w którym wykorzystano matematyczny model statku przedstawiony w rozdziałach 5. i 7. (tzw. obliczenia wzorcowe). Ponieważ opracowana metoda parametryczna (rozd. 6. i 8.) jest wyjątkowo dokładna przy obliczaniu prędkości

eksploatacyjnej statku (rozdz. 11.4) to metoda ta może być zastosowana w programie PRE-STAT. Pozwoli to nie tylko na skrócenie czasu obliczeń, ale przede wszystkim uprości korzystanie z programu dla dowolnego statku ze względu na małą liczbę podstawowych parametrów geometrycznych wykorzystywanych w algorytmie obliczania prędkości.

13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem badań przedstawionych w monografii jest nowatorska metoda prognozowania prędkości eksploatacyjnej statku w warunkach pogodowych występujących na zadanej linii żeglugowej, przystosowana do zastosowania w projektowaniu wstępnym. W metodzie tej wykorzystano opracowane parametryczne modele całkowitego oporu statku i naporu śruby okrętowej oraz mocy napędu zawierające jedynie podstawowe parametry projektowe, którymi operuje projektant na etapie projektowania wstępnego.

Dotychczasowa wiedza o zależnościach pomiędzy podstawowymi parametrami statku i jego napędu a prędkością eksploatacyjną jest skromna, co stanowi poważne utrudnienie w prowadzeniu prac projektowo-studialnych. Usunięcie tych ograniczeń przez dostarczenie wiedzy identyfikującej te zależności, ustalenie wyników (parametrów) istotnie wpływających na badaną właściwość statku, opracowanie narzędzi pozwalających na prowadzenie przedmiotowych badań, a następnie przedstawienie propozycji metod wyznaczania badanej charakterystyki statku – jest istotnym uzupełnieniem wiedzy i oryginalnym wkładem w rozwój teorii projektowania statków transportowych.

Tematyka badawcza monografii i jej zakres dotyczą bardzo ważnych zagadnień, których opracowanie stanowi podstawę do prognozowania prędkości eksploatacyjnej statku w rzeczywistych warunkach pogodowych występujących na linii żeglugowej, na którą projektowany jest statek. Od tej prędkości zależy wiele cech statku, a przede wszystkim efekty ekonomiczne jego eksploatacji. Od prędkości statku i zainstalowanej mocy zależy także wielkość emisji spalin, w tym CO₂, co stanowi kryterium dopuszczenia statku do eksploatacji (projektowy wskaźnik efektywności energetycznej EEDI). Wielkości te są wyznaczane na etapie projektowania wstępnego na podstawie nielicznego zbioru parametrów projektowych.

Porównanie uzyskanych w monografii rezultatów z dotychczasowym stanem wiedzy pozwala na przedstawienie poniższych wniosków:

1. Nowość i oryginalność rezultatów monografii, stanowiących wkład w rozwój teorii projektowania statków transportowych, polega na uzyskaniu następujących osiągnięć:

- Wyprowadzeniu uogólnionych równań całkowitego oporu statku transportowego w rzeczywistych warunkach pogodowych, przy dowolnym kierunku działania elementów środowiska względem statku. W całkowitym oporze uwzględniono opór statku na wodzie spokojnej płynącego z kątem dryfu oraz dodatkowy opór od wiatru, prądu morskiego, falowania oraz wychylonej płetwy sterowej. Dla każdego składnika oporu całkowitego uwzględniono trzy jego składowe (wzdłuż osi X, Y i moment obrotowy względem osi Z).

- Opracowaniu strukturalnych algorytmów składników oporu całkowitego i ich implementację komputerową. Wykonane obliczenia symulacyjne całkowitego oporu statku w rzeczywistych warunkach pogodowych wykorzystano do wyznaczenia przybliżonych metod parametrycznych, wyrażonych zależnościami analitycznymi, aproksymującymi relacje pomiędzy głównymi parametrami statków transportowych a jego oporem całkowitym. Strukturę zależności dobrano, kierując się: wiedzą z dotychczasowych eksperymentów numerycznych,

dużą dokładnością aproksymacji (statystyczną i merytoryczną) oraz wymogiem przydatności w projektowaniu wstępnym, gdy kadłub statku definiowany jest nielicznym zbiorem wymiarów głównych.

- Wyprowadzeniu uogólnionych równań naporu śruby okrętowej wykorzystującej zadane pole pracy silnika napędowego dla statku pływającego w zmiennych warunkach pogodowych. Napór śruby okrętowej w zmiennych warunkach pogodowych może być poszukiwany w zadeklarowanym polu pracy silnika napędowego (bez przeciążenia lub z przeciążeniem), wykorzystując kryterium stałej prędkości statku, stałej mocy silnika, stałego jednostkowego zużycia paliwa itp.

- Wyprowadzeniu uogólnionych równań mocy, prędkości obrotowej i pola pracy silnika napędowego statku transportowego oraz równań opisujących współczynniki niezbędne do określenia ogólnej sprawności napędowej statku.

- Opracowaniu strukturalnych algorytmów naporu śruby i mocy napędu statku i ich implementację komputerową. Wykonane obliczenia symulacyjne naporu śruby i mocy napędu w rzeczywistych, zmiennych warunkach pogodowych występujących na linii żeglugowej wykorzystano do wyznaczenia przybliżonych metod parametrycznych, wyrażonych zależnościami analitycznymi, aproksymującymi relacje pomiędzy głównymi parametrami statków transportowych a naporem śruby i mocą napędu. Strukturalne zależności dobrano, kierując się: wiedzą z dotychczasowych eksperymentów numerycznych, dużą dokładnością aproksymacji (statystyczną i merytoryczną) oraz wymogiem przydatności w projektowaniu wstępnym, gdy kadłub statku definiowany jest nielicznym zbiorem wymiarów głównych.

- Opracowaniu algorytmu do celowej redukcji prędkości i/lub zmiany kursu statku w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości parametrów kołysań i innych właściwości morskich, występujących podczas pływania statku po sfalowanej wodzie, a mających wpływ na jego bezpieczeństwo. Na podstawie wykonanych obliczeń symulacyjnych wartości parametrów wybranych właściwości morskich opracowano przybliżone metody parametryczne, wyrażone zależnościami analitycznymi, aproksymującymi relacje pomiędzy głównymi parametrami statków transportowych a wartościami parametrów wybranych właściwości morskich. Strukturalne zależności dobrano, kierując się: wiedzą z dotychczasowych eksperymentów numerycznych, dużą dokładnością aproksymacji (statystyczną i merytoryczną) oraz wymogiem przydatności w projektowaniu wstępnym, gdy kadłub statku definiowany jest nielicznym zbiorem wymiarów głównych.

- Opracowaniu uniwersalnej bazy średnich statystycznych długoterminowych (sezonowych) parametrów falowania i skorelowanych z nimi parametrów wiatru występujących na liniach żeglugowych. Wykonano nowatorską implementację komputerową tej bazy, przygotowaną do symulacji ruchu statku na linii żeglugowej, a tym samym do obliczeń prędkości eksploatacyjnej.

- Opracowaniu uniwersalnego i nowatorskiego algorytmu obliczania średniej długoterminowej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego. Implementacja komputerowa łącznie z modelami parametrycznymi: oporu całkowitego, naporu śruby i mocy napędu oraz właściwości morskich statku pozwoliły na prognozowanie średniej, długoterminowej prędkości eks-

ploatacyjnej na etapie projektowania wstępnego, gdy kadłub statku definiowany jest nielicznym zbiorem wymiarów głównych.

– Zbadaniu wpływu podstawowych parametrów projektowych statku transportowego na prognozowaną prędkość eksploatacyjną na zadanej linii żeglugowej. Porównanie otrzymanych wyników z wykorzystaniem funkcji aproksymacyjnych z odpowiednimi wynikami symulacji z wykorzystaniem wzorów strukturalnych lub z wynikami badań modelowych lub pomiarów na mili pomiarowej wykazało, że osiągnięto wyjątkowo wysoką dokładność. Oznacza to, że **zrealizowano założony cel monografii i przyjęte hipotezy robocze zostały potwierdzone, a opracowana metoda prognozowania średniej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego na podstawie nielicznego zbioru wymiarów głównych jest całkowicie przydatna w projektowaniu wstępnym.**

2. Monografia dostarcza wniosków wzbogacających dotychczasową wiedzę dotyczącą projektowania wstępnego statków transportowych, mających charakter poznawczy, a także może być wykorzystana do nowatorskiego wstępnego projektowania statków oraz do badania na etapie wstępnym różnych własności statku lub jego systemów, np. układu napędowego.

Opracowana metoda obliczania prędkości eksploatacyjnej statku w statystycznych warunkach pogodowych może być:

– Wykorzystana w nowatorskiej metodzie projektowania statku, w której podstawowym kryterium projektowania jest efekt ekonomiczny z eksploatacji statku.

– Zastosowana do optymalizacji parametrów projektowych już na etapie wstępnym. Projektowany w ten sposób statek będzie lepiej dostosowany do aktualnej lub przewidywanej sytuacji na rynku transportu morskiego.

– Wykorzystana już na etapie wstępnym do oceny doskonałości wykonanego projektu statku, np. zużycia paliwa, emisji CO₂ (wskaźnik EEDI) w długim okresie eksploatacji statku.

– Wykorzystana do badania stopnia zużycia silnika napędowego (na podstawie: średniego statystycznego punktu pracy i odpowiadających temu punktowi parametrów pracy silnika). Można precyzyjniej planować przeglądy i remonty silnika.

– Z powodzeniem zastosowana w prognozowaniu trasy żeglugi. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem eksperymentalnego programu komputerowego wykazały wysoką dokładność prognozowania parametrów eksploatacyjnych statku na linii żeglugowej. Zastosowanie w programie do prognozowania trasy żeglugi statku modelu parametrycznego znacznie uprości przygotowanie danych i korzystanie z tego programu bez utraty dokładności.

– Opracowana metoda pozwala na badanie wpływu starzenia się kadłuba (pogarszanie się stanu powierzchni kadłuba) na spadek średniej statystycznej prędkości statku, na związane z tym straty ekonomiczne i planowanie remontów podwodnej części kadłuba statku.

LITERATURA

- [1] Abramowski T. 2011. *Elementy multidyscyplinarnej optymalizacji wskaźników techniczno-ekonomicznych we wstępnym projektowaniu współbieżnym statków transportowych*, Szczecin, Wydaw. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, ISBN 978-83-7663-087-8.
- [2] Abramowski T. 2013. Application of artificial intelligence methods to preliminary design of ships and ship performance optimization, *Naval Engineers Journal*, 09/2013, 125(3), 87–98.
- [3] Barrass C.B. 2004. *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, Elsevier B-H, ISBN 978-0-7506-6000-6.
- [4] van Berlekom W.B., Trägårdh P., Dellag A. 1975. Large tankers – wind coefficients and speed loss due to wind and sea, *Transactions RINA*, vol. 117, 41–58.
- [5] Biancardi C.G. 1990. Practical calculation method of ship manoeuvring characteristics at the design stage, *International Shipbuilding Progress*, vol. 37, no. 411, 221–245.
- [6] Blendermann W. 1991. Manoeuvring technical manual, *Shiff und Hafen*, Heft 3/1990, Heft 4/1991.
- [7] Bowditch N. 1995. *The American Practical Navigator*, National Imagery And Mapping Agency, ISBN 978-0403098958.
- [8] Calisal S.M., Howard D., Mikkelsen J. 1977. A seakeeping study of the UBC series, *Marine Technology*, vol. 34, no. 1, 10–23.
- [9] Cepowski T. 2004. Badanie kołysań bocznych statku na założonej trasie żeglugi, *Zeszyty Naukowe* nr 2(74), Szczecin, Akademia Morska w Szczecinie, 31–39.
- [10] Cepowski T. 2007. Application of artificial neural networks to approximation and identification of sea-keeping performance of a bulk carrier in ballast loading, *Polish Maritime Research*, no. 4(54), vol. 14, Gdańsk, 31–37.
- [11] Cepowski T. 2007. Application of statistical methods and artificial neural networks for approximating ship's roll in beam waves, *Polish Maritime Research*, no. 2(44), vol. 12, Gdańsk, 22–28.
- [12] Cepowski T. 2008. *Modelling of Added Wave Resistance on the basis of the Ship's Design Parameters*, Monografia “Computer Systems Aided Science and Engineering Work in Transport, Mechanics and Electrical Engineering”, nr 121, Radom, 39–46.
- [13] Cepowski T. 2009. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do przewidywania slemingu, *Napędy i sterowanie*, nr 2, 95–98.
- [14] Cepowski T. 2010. Design guidelines for predicting wave resistance of ro-ro Ferries in initial designing stage, *Zeszyty Naukowe* nr 22(94), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 5–9.
- [15] Cepowski T. 2011. *Numeryczne modelowanie właściwości morskich wybranych typów statków na wstępnym etapie projektowania*, Szczecin, Wydaw. Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, ISBN 978-83-89901-60-6.
- [16] Chądzyński W. 2001. *Elementy współczesnej metodyki projektowania obiektów pływających*, Szczecin, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej KOiPSM, ISBN 83-88764-95-0.
- [17] Cisowski P. 2012. *Poznanie własności sieci neuronowych w środowisku MATLAB*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 978-83-7493-712-2.
- [18] Dudziak J. 2008. *Teoria okrętu*, Gdańsk, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, wyd. II, ISBN 978-83-60584-09-5.

- [19] Dudziak J. 1988. *Algorytm prognozowania właściwości morskich statku podobnego obiektu oceanotechnicznego na fali w warunkach ograniczonej głębokości wody i prądu*, Opracowanie CTO, RH-88/Z-83, Gdańsk.
- [20] Dudziak J., Szczuka E., Pawlik A. 1990. *Instrukcja użytkowania programu WARES. Krótko-terminowa prognoza właściwości morskich statku płynącego na fali regularnej przestrzennej*, Opracowanie RH-87/U-001, Centrum Techniki Okrętowej, Ośrodek Hydromechaniki Okrętu, Gdańsk.
- [21] Duxbury A.C., Duxbury A.B., Sverdrup K.A. 2002. *Oceany świata*, Warszawa, PWN, ISBN 978-83-01137-8-09.
- [22] English J.W., Wise D.A. 1976. *Hydrodynamic Aspects of Dynamic Positioning*, NEC 3/1976.
- [23] *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas, No. 30.5, March 2000.
- [24] Faltinsen O.M. 1990. *Sea loads on ships and offshore structures*, Ocean Technology Series, Cambridge, ISBN 0-521-45870-6.
- [25] Gabrielli G., Karman T.V. 1950. What price speed, *Mechanical Engineering*, no. 72 (10), 775–781.
- [26] *General Technical Data for Marine Diesel Engines* 2006. SULZER.
- [27] *Consideration of the energy efficiency design index for new ships*. 2009. GHG-WG 2/2/7.
- [28] Girtler J., Kitowski Z., Kuriata A. 1995. *Bezpieczeństwo okrętu na morzu*, Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności, ISBN 832061161X.
- [29] Grigoropoulos G.J., Athanassoulis G.A. 1996. Investigation of an extended-Lewis form family of ship sections and its application to seakeeping optimization, *The Royal Institution of Naval Architects*, vol. 138, 131–144.
- [30.] Harries S., Heimann J., Hochkirch K. 2006. *Advanced Design of Container Carriers for Improved Transport Efficiency*, RINA Conf. Design & Operation of Container Ships, London.
- [31] Hirano M. 1980. On the calculation method of ship manoeuvring motion at the initial design phase, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol. 147, 144–153.
- [32] Hogben N., Dacunha N.M.C., Olliver G.F. 1986. *Global Wave Statistics*, BMT, ISBN 0946653380.
- [33] Hogben N., Lumb F.E. 1967. *Ocean Wave Statistics*, National Physical Laboratory, London ISBN 760043019.
- [34] Holec M., Tymański P. 1980. *Podstawy meteorologii i nawigacji meteorologicznej*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, ISBN 83-215-1110-4.
- [35] Hollenbach K.U. 1998. Estimating resistance and propulsion for single screw and twin screw ships, *Ship Technology Research*, no. 45, 2/1998, 72–76.
- [36] Holtrop J. 1984. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data, *International Shipbuilding Progress*, no. 363, 272–276.
- [37] Holtrop J. 1988. *A Statistical Resistance Prediction Method with a Speed Dependent Form Factor*, Proceedings of the 17th Session BSHC, Varna 17–22 October 1988, vol. 1, 3.1–3.7.
- [38] Holtrop J. 1977. A Statistical analysis of performance test result, *International Shipbuilding Progress*, vol. 24, no. 270, 23–28.
- [39] Holtrop J., Mennen G.G.J. 1982. An approximate power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, vol. 29, no. 335, 166–170.
- [40] Inoue S. i inni. 1981. Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring, *International Shipbuilding Progress*, vol. 28, no. 321, 112–125.
- [41] Inoue S., Hirano M., Kijima K., Takashima J. 1981. A practical calculation method of ship manoeuvring motion, *International Shipbuilding Progress*, vol. 28, no. 325, 207–225.
- [42] *International Towing Tank Conference*. 2008. Recommended Procedures and Guidelines.

- [43] Isherwood M.R. 1973. Wind resistance of marchant ship, *The Royal Institution of Naval Architects*, vol. 115, 327–338.
- [44] Kaliciński J., Zdybek T. 1993. *Prognozowanie charakterystyk hydrodynamicznych podwodzi statków typu RO-RO*, X Sympozjum Hydromechaniki Okrętowej, Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk, t. II, 113–128.
- [45] Karppinen T. 1987. *Criteria for Seakeeping Performance Predictions*, Technical Research Centre of Finland, Ship Laboratory, ESPOO, Helsingfors.
- [46] Kükner A., Aydm M. 1997. Influence of design parameters on vertical motions of trawler hull forms in head seas, *Marine Technology*, vol. 34, no. 3, 181–196.
- [47] Lloyd A.R.J.M. 1989. *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*, Ellis Horwood Series in Marine Technology, Chichester, England, ISBN 9780470212325.
- [48] Medyna P., Wiśniewski B., Chomski J. 2006. *Dynamiczne prognozowanie trasy statku z uwzględnieniem omijania cyklonów tropikalnych*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EXPLOSHIP 2006, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, nr 11(83), Szczecin, 211–222.
- [49] *Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ship's*. 2009. MEPC.1/Circ.681.
- [50] MEPC 62/24/Add. 1, Annex19, Resolution MEPC.203(62), 2011.
- [51] Mertins H.O. 1976. *Compendium of lecture notes in marine meteorology for class III and class IV personnel*, World Meteorological Organization, ISBN 9263104344.
- [52] *Metoda przeliczania wyników prób prędkości statku na warunki umowne w I stanie załadowania oraz korygowanie prognozy napędowej na II stan załadowania*. 1992. Raport techniczny: RH-92/1-004, Centrum Techniki Okrętowej, Ośrodek Hydromechaniki Okrętu, Gdańsk.
- [53] Minsaas K.J., Thon H.J., Kauczyński W. 1986. *Influence of Ocean Environment on Thruster Performance*, Proc. of. Int. Symp. Propeller and Cavitation, Supplementary volume, Shanghai 1986, The Editorial Office of Shipbuilding of China, 124–142.
- [54] Ochi M.K. 1978. Wave statistics for the design of ships and ocean structures, *SNAME Transactions*, vol. 86, 47–76.
- [55] Oosterveld M.W.C., van Oossanen P. 1975. Further computer-analyzed data for the wageningen B-screw Series, *International Shipbuilding Progress*, vol. 22, no. 251, 3–14.
- [56] Pawłowski Z. 1976. *Statystyka matematyczna*, Warszawa, PWN.
- [57] Pinkster J.A. 1980. *Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures*, Netherlands Ship Model Basin, Publication No. 650, Wageningen, The Netherlands.
- [58] Plewiński L. 1988. *Podstawy ekonomiki transportu morskiego*, Szczecin. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie.
- [59] Ralston A. 1971. *Wstęp do analizy numerycznej*, Warszawa, PWN, ISBN 83-01-01626-4.
- [60] Rawson K.J., Tupper E.C. 2001. *Basic Ship Theory*, Fifth Edition, B-H 2001.
- [61] Robinson D.W. 1972. *Sea State Distribution for Use in the Calculation of Long-Term Wave Induced Ship Responses*, Lloyd's Register of Shipping, Development Unit Report 4.
- [62] Schneekluth H., Bertram V. 1998. *Ship Design for Efficiency and Economy*, 2nd ed., B-H 1998, ISBN 0 7506 4133 9.
- [63] Stanisław A. 2000. *Przystępny kurs statystyki z wykorzystaniem programu STATISTICA PL na przykładach z medycyny*, t. II, Kraków, StatSoft Polska, ISBN 83-912346-4-9.
- [64] Stopford M. 2003. *Maritime Economics*, Taylor & Francis e-Library, ISBN 0-203-44266-0.
- [65] Szantyr J.A. 1994. A method for analysis of cavitating marine propellers in non-uniform flow, *Intern. Shipbuilding Progress*, vol. 41, no. 427.

- [66] Szantyr J.A., Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T. 2009. A complete design of ship propellers using the new computer system, *Polish Maritime Research*, no. 1(59)/2009 vol. 16, 29–34.
- [67] Szelangiewicz T. 1995. *Wpływ kotwicznego systemu utrzymania pozycji na kołysania statku w obecności wiatru, prądu i falowania*, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 523, Szczecin, Wydaw. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, ISBN 83-86359-42-0.
- [68] Szelangiewicz T. 1999. *Bezpieczeństwo statku podczas pływania w warunkach sztormowych*, Konferencja: Problemy eksploatacji statków morskich i śródlądowych oraz urządzeń portowych, EKSPLO-SHIP'99, Międzyzdroje 09–13 maja 1999, t. 2, 185–192.
- [69] Szelangiewicz T., Cepowski T. 2001. Application of artificial neural networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 1, *Polish Maritime Research*, no. 3(29), vol. 8, Gdańsk, 11–15.
- [70] Szelangiewicz T., Cepowski T. 2001. Application of artificial neural networks to investigation of ship seakeeping ability, Part 2, *Polish Maritime Research*, no. 4(30), vol. 8, Gdańsk, 26–29.
- [71] Szelangiewicz T. 2001. *Estimation operational effectiveness of ship sails in waves*, HYDRO-NAV'2001, 14th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design, Szczecin–Międzyzdroje, Poland, September 27–29, 324–334.
- [72] Szelangiewicz T., Abramowski T., Żelazny K. 2010. *Developing of a Computer System Aiding the Determination of Mean Long-Term Service Speed*, 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, COMPIT 2010 April 12th–14th, Gubbio, Italy, 221–234. (Artykuł w monografii 9th Int. Conf. on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, ISBN 978-3-89220-649-1).
- [73] Szelangiewicz T., Abramowski T., Żelazny K. 2010. Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics, Part III: Influence of modifications on screw propeller efficiency, *Polish Maritime Research*, no. 1(63), vol. 17, Gdańsk, 10–13.
- [74] Szelangiewicz T., Wiśniewski B., Żelazny K. 2014. Forecasting operating speed of the ship in the selected weather conditions, EXPLO-SHIP 2014, *Zeszyty Naukowe* nr 38(110), Szczecin, Akademia Morska w Szczecinie, 89–98.
- [75] Szelangiewicz T., Wiśniewski B., Żelazny K. 2014. The influence of wing, wave and loading condition on total resistance and speed of the vessel, *Polish Maritime Research*, no 3(83), vol. 21, Gdańsk, 61–67.
- [76] Tadeusiewicz R. 1993. *Sieci neuronowe*, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, ISBN 83-85769-03-X.
- [77] Trzeciak S. 2000. *Meteorologia morska z oceanografią*, Warszawa, PWN, ISBN 8301132256.
- [78] Watson D.G.M. 1998. *Practical Ship Design*, Elsevier, ISBN 0080429998.
- [79] Wiśniewski B. 1986. *Optymalizacja drogi morskiej statku z uwzględnieniem warunków pogodowych*, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin.
- [80] Wiśniewski B. 1998. *Falowanie wiatrowe*, Uniwersytet Szczeciński, Rozprawy i studia, t. 230, Szczecin.
- [81] Wiśniewski B., Medyna P., Klein R., Jakubowski M. 2002. Wykorzystanie pogody prognozowanej oraz klimatycznych warunków średnich w wyznaczaniu trasy na Atlantyku Północnym dla statków o różnych prędkościach eksploatacyjnych, EXPLO-SHIP 2002, *Zeszyty Naukowe* nr 65, Wyższa Szkoła Morska, Szczecin, 363–373.
- [82] Wiśniewski B., Korwin-Piotrowski T., Wielgosz M. 2012. *Procedury zintegrowanego planowania i programowania tras oceanicznych statków z wykorzystaniem Ship Performance Optimisation System*, Szczecin, Wydaw. Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, ISBN 978-83-89901-67-5.
- [83] Wiśniewski B., Wolski T. 2012. *Zintegrowany system programowania tras statków na oceanach w aspekcie bezpieczeństwa statku, ładunku i ludzi*, Praca naukowo-badawcza, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin.

-
- [84] Wnęk A.D., Paço A., Zhou X-Q., Guedes Soares C. 2010. *Numerical and Experimental Analysis of the Wind Forces Acting on LNG Carrier*, V European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 14–17 June 2010.
- [85] Voitkounski Y.T. 1985. *Ship Theory Handbook*, Sudostroenie, Leningrad.
- [86] Yong J., Smith R., Hatano L., Hillmansen S. 2005. *What Price Speed – Revisited*, The Railway Research Group, Imperial College, Ingenia, Issue 22, 46–51.
- [87] Vorabjew Y.L., Guliev Y.M.. 1988. *Application of aerodynamics test results in ships and floating structures at sea problems*, SMSSH'88, The Proceedings of the 17th Session, Varna, vol. 1, 17–22 October 1988, 32-1–32-7.
- [88] Yoshi Ozaki, John Larkin, Kirsi Tikka, Keith Michel. 2010. *An Evaluation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Baseline for Tankers, Containership, and LNG Carriers*, ABS.
- [89] Zborowki A., Sainsbury S.R. 1988. Small Vessel Hull Form Optimization for Heave and Pitch Performance, *Marine Technology*, vol. 25, no. 4, 293–303.
- [90] Zdybek T. 1985. *Metody prognozowania i oceny właściwości żeglugowych w projektowaniu statków*, Materiały VI Sympozjum Hydromechaniki Okrętowej, Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk 9–11.X. 1985, zeszyt nr 1, 336–366.
- [91] Żelazny K., Szelangiewicz T. 1999. *Symulacja ruchu statku w warunkach sztormowych*, Konferencja: Problemy eksploatacji statków morskich i śródlądowych oraz urządzeń portowych, EKSPLO-SHIP'99, Międzyzdroje 09–13 maja 1999, t. 2, 193–202.
- [92] Żelazny K. 2005. *Numeryczne prognozowanie średniej długoterminowej prędkości eksploatacyjnej statku transportowego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin.
- [93] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2005. *Influence of The Navigation Line, Type and Size of The Cargo Vessel on Probability of Maintaining the Assumed Mean Long-Term Ship Service Speed*, 16th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design 3rd International Symposium on Ship Manoeuvring, Gdańsk–Ostróda, Poland, 7–10 September 2005, 397–406.
- [94] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2005. *Prediction of Mean Long-Term Ship Service Speed on the Ocean Routes*, Part II: *Calculation of Mean Long-Term Ship Service Speed*, Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk Marine Technology Transactions, vol. 16, 269–287.
- [95] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2006. Calculations of ship's resistance and speed as part of long-term forecast, EXPLO-SHIP 2006, *Zeszyty Naukowe* nr 11(83), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 297–306.
- [96] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2006. A relations between an ocean route and ship size and the mean long-term ship speed, EXPLO-SHIP 2006, *Zeszyty Naukowe* nr 11(83), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 306–318.
- [97] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2006. Calculation of the mean long-term service speed of transport ship, Part I: Resistance of ship sailing on regular shipping route in real weather conditions, *Polish Maritime Research*, no. 4(50), vol. 13, 23–31.
- [98] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2007. Calculation of mean long-term service speed of transport Ship, Part II: Service speed of ship sailing on regular shipping route in real weather conditions, *Polish Maritime Research*, no 1/2007, 28–32.
- [99] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2007. Calculation of mean long-term service speed of transport ship, Part III: Influence of shipping route and ship parameters on its service speed, *Polish Maritime Research*, no 2/2007, 27–32.
- [100] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2007. Mean long-term service parameters of transport ship propulsion system, Part I: Screw propeller service parameters of transport ship sailing on a given shipping route, *Polish Maritime Research*, no 4(54), 18–23.
- [101] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2007. Mean long-term service parameters of transport ship propulsion system, Part II: Propulsion engine service parameters of transport ship sailing on a given shipping route, *Polish Maritime Research*, no 4(54), 47–52.

- [102] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2008. *Mean Long-Term Screw Propeller Service Parameters of Transport Ship Sailing on a Given Shipping Route*, Problemy Eksploatacji, Radom, Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, nr 2/2008, 213–221.
- [103] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2008. *Mean Long-Term Propulsion Engine Service Parameters of a Transport Ship Sailing on a given Shipping Route*, Problemy Eksploatacji, Radom, Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, nr 3/2008, 103–111.
- [104] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2010. The propeller thrust and speed reduction as a result of the propeller emergence on a given ocean route, EXPLO-SHIP 2010, *Zeszyty Naukowe* nr 22(94), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 63–66.
- [105] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2010. Prediction of the influence of emergence of propeller on the propeller thrust reduction during ship navigation on waves, EXPLO-SHIP 2010, *Zeszyty Naukowe* nr 21(93), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 10–13.
- [106] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2010. Prediction of the influence of emergence of propeller on the propeller thrust and speed reduction during ship navigation on a given ocean route, *Journal of Polish CIMAC*, vol. V, nr 2, Gdańsk, 161–173.
- [107] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2011. Influence of the service margin of service parameters of transport ship propulsion system, Part I: Propulsion engine service parameters of transport ship sailing on a given shipping route, *Journal of Polish CIMAC*, vol. 6, nr 1, Gdańsk, 191–200.
- [108] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2011. Influence of the service margin of service parameters of transport ship propulsion system, Part II: Screw propeller service parameters of transport ship sailing on a given shipping route, *Journal of Polish CIMAC*, vol. 6, nr 1, Gdańsk, 201–210.
- [109] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. *Calculation method of the f_w coefficient – decrease in a ship speed according to the EEDI formula*, 5th International Conference on Maritime Transport, Technological Innovations and Research, MARITIME TRANSPORT' 12, Barcelona, Spain, 1299–1322. (Artykuł w monografii 5th International Conference on Maritime Transport, Technological Innovations and Research, ISBN 978-84-7653-939-2).
- [110] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. Increasing ship propulsion efficiency as an alternative to help reduce fuel consumption and CO₂ emission – Part I: Energy Efficiency Design Index (EEDI) as a new criterion in ship design, *Journal of Polish CIMAC*, Vol. 7, Nr 1, Gdańsk, 227 – 233.
- [111] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. Increasing ship propulsion efficiency as an alternative to help reduce fuel consumption and CO₂ emission – Part II: Research on hull and propeller design optimisation in order to decrease the EEDI value, *Journal of Polish CIMAC*, vol. 7, nr 1, Gdańsk, 234–244.
- [112] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. Energy efficiency design index as a new criterion in ship design, *Zeszyty Naukowe* nr 32(104), z. 1, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 97–101.
- [113] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. The influence of chosen parameters on the energy efficiency design Index, *Zeszyty Naukowe* nr 32(104), z. 1, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 102–107.
- [114] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2012. *Projektowy wskaźnik efektywności energetycznej (EEDI) – czy jest możliwa redukcja emisji CO₂ na statkach morskich*, Konferencja TransComp 2012, Technika transportu szynowego TTS, nr 9/2012, 485–493.
- [115] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2013. *Poziom emisji CO₂ jako kryterium projektowe współczesnych statków transportowych*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa TRANSPORT XXI wieku, Prace Naukowe – Transport, Politechnika Warszawska, z. 98, Warszawa, 625–650.
- [116] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2013. The influence of the propeller emergence on the torque during sailing of a ship on a regular wave, *Zeszyty Naukowe* nr 35(107), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 138–143.

- [117] Żelazny K., Szelangiewicz T. 2013. The influence of propeller emergence on the load of a marine engine of a ship sailing on irregular wave, *Zeszyty Naukowe* nr 35(107), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 144–148.
- [118] Żelazny K. 2014. Approximate Method of Calculating Forces on Rudder During Ship Sailing on a Shipping Route, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 8, no. 3, 459–464.
- [119] Żelazny K. 2014. A simplified method for calculating propeller thrust decrease for a ship sailing on a given shipping lane, *Polish Maritime Research*, no. 2(82), vol. 21, Gdańsk, 27–33.
- [120] Żelazny K. 2014. A method of calculation of ship resistance on calm water useful at preliminary stages of ship design, *EXPLO-SHIP 2014, Zeszyty Naukowe* nr 38(110), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 125–130.
- [121] Żelazny K. 2014. Approximate method of calculation of the wind action on a bulk carrier, *EXPLO-SHIP 2014, Zeszyty Naukowe* nr 38(110), Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 131–135.

Inne źródła:

- [122] *Global Wave Statistics*, BMT Fluid Mechanics, 2011,
dostępne: <http://www.globalwavestatisticsonline.com/index.html>
- [123] *Mapy falowania* – Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej Wydziału Nawigacyjnego Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni,
dostępne: http://ocean.am.gdynia.pl/student/oceano1/falo/fal_mapy.html
- [124] *The NOAA Marine Environmental Buoy Database*, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012,
dostępne: <http://www.nodc.noaa.gov/BUOY/>

METHOD FOR DETERMINATION OF SERVICE SPEED USEFUL IN THE INITIAL DESIGN OF CARGO VESSELS UNDER STATISTICAL WEATHER CONDITIONS OCCURRING ON SHIPPING ROUTE

Summary

During the ship design phase, the key decisions on technical and operational parameters, which define the subsequent economic effects of its operation, are normally made at an initial design stage. At this stage the ship's designer has only a limited range of geometrical parameters of the ship being designed.

This monograph addresses a new method of forecasting one the most important design parameters which is the service speed of a vessel. It contains the following parametric models: total resistance and ship driving power, which enable the calculation of the average statistical service speed of the ship with the definite probability of exceeding on any shipping line with available mean statistical long-term (seasonal) data on weather conditions: wind and ocean waves. The resulting mean statistical of the ship's service speed is dependent only on the basic geometrical parameters of the ship. Thus it makes it suitable for use at the initial design stage.

The study tested various approximation methods:

- ship resistance on calm water, during movement with drift angle;
- additional resistance from wind, ocean waves and surface currents' activity;
- additional resistance resulting from the turned fin rudder to maintain the desired course of the ship;
- thrust and torque on the propeller, considering the decrease in the propeller thrust when the propeller emerges from water during waves sailing;
- power and rotational speed of the engine;
- seakeeping of the ship – if any allowable values of selected seakeeping are exceeded, the ship's speed may need to be deliberately reduced.

All the listed parametric models have been developed for the four types of transport vessels: container carriers, tankers, general cargo and LNG vessels. All the models were tested from the statistical and substantive perspective, i.e. the calculations performed for vessels built were compared with the results of model tests or measurements from the acceptance tests of the vessel built. The results of these tests displayed greater accuracies than other parametric models known in the literature.

For the purposes of forecasting of the service speed of the ship, we developed a special database of mean, statistical long-term (seasonal) ocean waves and wind parameters, which normally occur on shipping lines.

The calculations of mean, statistical ship speed, as performed with the newly-developed method, are characterized by great precision and are of use at the initial design stage. The developed method can be used in many other issues related to design and optimization and operation, including in the forecasting the optimum course of the shipping line.

VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG VON BETRIEBSGESCHWINDIGKEITEN BEIM ENTWERFEN VON TRANSPORTSCHIFFEN BEI STATISTISCHEN HERRSCHENDEN WETTERBEDINGUNGEN AUF SCHIFFFAHRTSLINIEN

Zusammenfassung

Beim Entwerfen eines Schiffes werden die wichtigsten Entscheidungen über technisch-betriebliche Parameter, die für spätere Ökonomiseffekte seines Betriebs entscheidend sind, in der Vorentwurfsetappe getroffen. In dieser Etappe verfügt der Projektant lediglich über einen beschränkten Umfang von geometrischen Parametern, die das entworfene Schiff charakterisieren.

Die Monographie betrifft ein neues Verfahren zum Prognostizieren eines der wichtigsten Entwurfparameter, d. i. der Betriebsgeschwindigkeit des Schiffes. Es beinhaltet Parametermodelle: des Gesamtwiderstandes und der Antriebsleistung des Schiffes, die das Berechnen der mittleren statistischen Betriebsgeschwindigkeit des Schiffes erlauben, mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit deren Überschreitung auf einer beliebigen Schifffahrtslinie, für welche die mittleren langfristigen (saisonbezogenen) Werte von Wetterparametern – des Windes und des Seeganges – bekannt sind. Die nach diesem Verfahren ermittelte mittlere statistische Betriebsgeschwindigkeit des Schiffes hängt nur von geometrischen Grundparametern des Schiffs ab. Daher kann sie auch in der Vorentwurfsetappe verwendet werden.

In der Monographie wurden verschiedene Approximationsverfahren getestet:

- des Widerstands des Schiffes im glatten Wasser während der Fahrt mit Driftwinkel;
- des zusätzlichen Widerstands durch die Einwirkung von Wind, Seegang und Oberflächenströmungen;
- des zusätzlichen Widerstands durch ausgeschlagenes Flossenruder (zum Halten des vorgegebenen Kurses);
- des Propellerschubs und -moments unter Berücksichtigung des Schubabfalls beim Auftauchen des Propellers während der Fahrt des Schiffes auf einer Welle;
- der Leistung und Drehzahl des Antriebsmotors;
- der Seeigenschaften des Schiffs – eine eventuelle Überschreitung der zulässigen Werte von gewählten Seeigenschaften kann eine gezielte Reduzierung der Schiffsgeschwindigkeit zur Folge haben.

Die gewählten Parametermodelle wurden für vier Typen von Transportschiffen bearbeitet: Containerschiffe, Tanker, Massengutfrachter und LNG-Tanker. Alle Modelle wurden unter dem statistischen und meritorischen Gesichtspunkt getestet, d.h. die für gebaute Schiffe durchgeführten Berechnungen wurden mit Ergebnissen von Modelluntersuchungen oder mit den während der Übergabe-Probefahrten gemessenen Werten eines gebauten Schiffs vergli-

chen. Die Ergebnisse von diesen Tests wiesen größere Genauigkeiten als andere Parametermodelle aus der Literatur bekannte nach.

Für den Bedarf der Prognostizierung der Betriebsgeschwindigkeit des Schiffes wurde eine spezielle Datenbank der mittleren, statistischen langfristigen (saisonbezogenen) Parametern des Seeganges und des Windes, die auf Schifffahrtslinien auftreten, bearbeitet.

Die mit Hilfe des bearbeiteten neuen Verfahrens durchgeführten Berechnungen der mittleren statistischen Geschwindigkeit des Schiffes zeichnen sich durch sehr hohe Genauigkeit und Eignung zum Verwenden in der Vorentwurfsetappe aus. Das bearbeitete Verfahren kann auch für viele andere Probleme im Zusammenhang mit dem Entwerfen und Betrieb eingesetzt werden, u. a. zum Prognostizieren einer optimalen Schifffahrtslinie.