Przemysław Krata
Akademia Morska w Gdyni

OCENA ZAPASU STATECZNOŚCI STATKÓW RO-RO W TYPOWYCH STANACH ZAŁADOWANIA POD KĄTEM UNIKANIA REZONANSU KOŁYSAŃ BOCZNYCH

W artykule poruszono problem rezonansu kołysań bocznych statku jako istotnego czynnika wpływającego na bezpieczeństwo żeglugi. Wskazano na znaczenie parametrów statecznościowych statku w kontekście możliwości wystąpienia rezonansu. Następnie przedstawiono ocenę stateczności statków ro-ro w typowych eksploatacyjnych stanach załadowania pod kątem rozważanej możliwości intencjonalnego modyfikowania stateczności podczas rejsu, co ma prowadzić do wyjścia ze stref rezonansowych bez zmiany kursu lub prędkości statku lub zaledwie z niewielkimi zmianami. Pod uwagę wzięto zarówno wysokość metacentryczną statków ro-ro, jak i charakterystyki statecznościowe dla dużych kątów przechyłu, takie jak: wartość ramienia prostującego, kąt występowania maksimum krzywej Reeda i pole pod krzywą ramion prostujących. Wykazano, że w typowych stanach załadowania statki ro-ro mają wystarczający zapas stateczności, by jej modyfikacje mogły być użyte jako element unikania zagrożeń rezonansowych.

Słowa kluczowe: *stateczność statku, rezonans kołysań bocznych, modelowanie okresu kołysań własnych.*

WSTĘP

Dążenie do zapewnienia bezpieczeństwa żeglugi statków morskich obejmuje wiele elementów, w tym wysiłki projektowe i operacyjne związane ze statecznością statków. Stateczność statku morskiego, choć w szczegółach bywa różnie definiowana przez poszczególnych autorów, sprowadza się do zdolności statku do przeciwstawiania się momentom przechylającym i przegłębiającym, a tym samym do zachowywania równowagi stałej względem obrotów wokół osi wzdłużnej i poprzecznej kadłuba [6]. Od kilku stuleci zagadnienia statecznościowe rozwiązywane są na podstawie naukowych teorii, których podwaliny postrzega się w pracach Bouguera z 1746 roku, Eulera z roku 1749, Bernoulliego z roku 1757 i Attwooda z roku 1796. Opracowanie koncepcji wysokości metacentrycznej jako pierwszej miary stateczności statku przypisuje się Bouguerowi i miara ta jako jedyna pozostawała w użyciu do lat siedemdziesiątych XIX wieku [6]. W drugiej połowie XIX wieku znana już była nie tylko krzywa stateczności statycznej, a od czasu publikacji Moseleya z 1850 roku także pojęcie stateczności dynamicznej

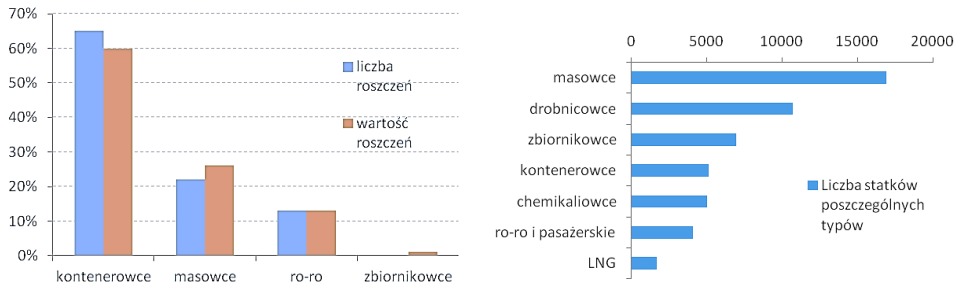
statku. Nie było ono jednak wówczas wykorzystywane w procesie eksploatacji statków morskich do oceny ich stateczności, jak również brakowało jeszcze w owym czasie opracowanych norm w tym zakresie [6].

Istotnym krokiem w rozwoju zagadnienia normowania stateczności statku była praca doktorska Jaakko Raholi z 1939 roku. Stosując analizę statystyczną, wyznaczył on granicznie dopuszczalne wartości charakterystycznych parametrów, takich jak: wysokość metacentryczna, wartość ramienia prostującego dla określonego kąta przechyłu statku, kąt występowania maksimum krzywej stateczności statycznej, wartości pól pod krzywą stateczności statycznej w określonych zakresach kątów przechyłu statku [13]. Powołana do życia w 1948 roku organizacja Inter-Governmental Maritime Consultative Organization (IMCO), przekształcona w 1982 roku w International Maritime Organization (IMO), wśród licznych aspektów swego działania na rzecz podnoszenia standardów bezpieczeństwa żeglugi opracowała zalecenia dotyczące normowania stateczności statków morskich [4]. W dużej mierze opierały się one na wcześniejszych analizach Raholi.

Bardzo istotnym uzupełnieniem kryteriów statecznościowych, normujących kształt krzywej stateczności statycznej, było opracowane w latach osiemdziesiątych XX wieku i wprowadzone rezolucją A.562(14) kryterium pogodowe [2]. Istotą tego kryterium jest wymaganie takiej stateczności, aby statek był w stanie przetrwać dynamiczne trawersowe uderzenie wiatru podczas jednoczesnego kołysania bocznego na fali. Kryterium to jako jedyne oparte zostało na modelu zjawiska dynamicznego przechylania statku, a nie tylko na statystyce. Dopiero kryteria statecznościowe drugiej generacji, będące wciąż w fazie opracowania, obejmują szereg dynamicznych zjawisk, mających istotne znaczenie dla bezpieczeństwa żeglugi [1]. Jednak termin ich wejścia w życie wciąż nie został jednoznacznie ustalony [10].

Nakreślone podejście do normowania stateczności statku jednoznacznie wskazuje, że statyczne kryteria, uzupełnione o bardzo uproszczony model przechylania statku na fali trawersowej ujęty w kryterium pogodowym, mają za zadanie zapewnienie bezpieczeństwa żeglugi w warunkach dynamicznego oddziaływania fal i wiatru. Praktyka pokazuje, że wymagane jest uzupełnienie wymogów statecznościowych o elementy związane z dynamicznymi, w tym nieliniowymi zjawiskami, próbą zaś spełnienia tych oczekiwań jest publikacja IMO Circ. 1228 *Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions*, stanowiąca poradnik dla kapitana, dotyczący unikania sytuacji niebezpiecznych na morzu w kontekście kołysań statku [5].

O potrzebie szerszego spojrzenia na stateczność statku aniżeli tylko przez aktualne kryteria mogą świadczyć notowane straty, wynikające z sytuacji niebezpiecznych, których poszczególne statki nie uniknęły. Cennym źródłem informacji o stratach ładunkowych notowanych w żegludze morskiej są raporty klubów P&I (instytucje oferujące *Protection and indemnity insurance*). Szwedzki raport z 2014 roku, przedstawiając straty ładunkowe wynikłe z powodu oddziaływania ciężkich warunków pogodowych, uwypukla sektor przewozów kontenerowych jako szczególnie narażony na te straty oraz żeglugę ro-ro, co prezentuje rysunek 1.



Rys. 1. Szkody ładunkowe zgłaszane do P&I The Swedish Club oraz liczebność floty światowej w sektorach [3, 14]

Fig. 1. *Cargo claims reported to P&I The Swedish Club and worldwide number of ships by type [3, 14]*

Co prawda, przedstawione na rysunku 1 dane wskazują, że liczba i wartość roszczeń zgłaszanych przez statki ro-ro jest dwukrotnie niższa niż w przypadku masowców, jednak flota masowców jest aż czterokrotnie liczniejsza. Tym samym liczba i wartość szkód notowanych na statkach ro-ro w przeliczeniu na jeden statek stawia ten segment rynku żeglugowego na drugim miejscu zaraz za kontenerowcami, jeśli chodzi o szkodowość spowodowaną przez oddziaływanie sztormowej pogody, co zdecydowanie uzasadnia podjęcie badań w tym obszarze.

1. OKREŚLANIE WARUNKÓW WYSTĄPIENIA REZONANSU KOŁYSAŃ BOCZNYCH STATKU

Wśród niebezpiecznych zjawisk, jakim może podlegać statek morski żeglujący na sfalowanej wodzie, na uwagę zasługuje m.in. rezonans kołysań bocznych. Same kołysania boczne nie muszą stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa statku, o ile osiągane chwilowe kąty przechyłu pozostają relatywnie niewielkie. Natomiast występowanie kołysań bocznych o dużych amplitudach może być niebezpieczne, doprowadzić do utraty ładunku i nawet przewrócenia statku. Wzmocnienie kołysań bocznych uzyskuje się w szczególności w wyniku wystąpienia rezonansu kołysań bocznych.

Z powodu realnego zagrożenia nieliniowo rosnącą amplitudą kołysań bocznych statku w warunkach wzbudzenia rezonansowego zaleca się unikanie okoliczności sprzyjających wystąpieniu rezonansu. Zagadnienie to występuje m.in. wśród kryteriów statecznościowych drugiej generacji [1, 10] oraz we wspomnianej już publikacji MSC.1/Circ.1228 [5]. Przedstawione w niej zalecenia dla kapitana, w zakresie rezonansu kołysań bocznych, zmierzające do uniknięcia niebezpiecznych sytuacji na morzu, związanych z żeglugą w ciężkich warunkach hydrometeorologicznych, skupiają się na unikaniu pewnych częstości spotkaniowych fali. Zgodnie z zaleceniami IMO należy tak dobierać wektor prędkości statku żeglującego w warun-

kach sztormowych, aby okres spotkaniowy fali T_E nadbiegającej z danego kąta kursowego nie był równy w przybliżeniu okresowi τ kołysań własnych statku ($T_E \approx \tau$) [5].

Wobec zaleceń bezpośrednio odwołujących się do okresu kołysań własnych statku powinna mieć zastosowanie metoda wyznaczania tego okresu. Publikacja [4] wskazuje na możliwość określenia tego okresu na podstawie obserwacji wykonanej na wodzie spokojnej. Mimo pewnej słuszności tego podejścia należy je traktować jako raczej niewykonalne, ponieważ ani nie jest praktykowane wzbudzenie kołysań statku przed wyjściem z portu (jeszcze na spokojnej wodzie portowego akwatorium), ani nie jest możliwa obserwacja kołysań na wodzie spokojnej już w czasie żeglugi w pogarszających się warunkach, gdy kapitan jest zainteresowany zaleceniami poradnika MSC.1/Circ.1228.

W praktyce powszechnie stosowana jest uproszczona metoda wyznaczania okresu kołysań swobodnych statku, zalecana przez Międzynarodową Organizację Morską w Kodeksie Stateczności Statku Nieuszkodzonego [4]. Bazuje ona na formule opisującej okres kołysań wahadła fizycznego [7]. Po uwzględnieniu początkowej poprzecznej wysokości metacentrycznej statku uzyskuje się zalecaną przez IMO formułę [4]:

$$\tau = \frac{2 \cdot c \cdot B}{\sqrt{GM}} \tag{1}$$

przy współczynniku c, opisującym względną wartość promienia bezwładności statku i mas wody towarzyszącej kołysaniu bocznemu, określoną wzorem:

$$c = 0{,}373 + 0{,}023 \cdot \frac{B}{T} - 0{,}043 \cdot \frac{L}{100} \tag{2}$$

gdzie:

- c – współczynnik uwzględniający poprzeczny promień bezwładności,
- B – szerokość statku,
- T – zanurzenie statku,
- L – długość statku,
- GM – poprzeczna początkowa wysokość metacentryczna statku.

Bardziej zaawansowana metoda wyznaczania okresu kołysań własnych statku i w konsekwencji częstości rezonansowej została zaprezentowana w pracy [11] i szeroko omówiona w kontekście wpływu poszczególnych składowych równania kołysań na uzyskany wynik w pracy [12]. Opiera się ona na następującym równaniu kołysań bocznych statku z uwzględnieniem nieliniowości momentu prostującego:

$$\ddot{\phi} + 2\mu \cdot \dot{\phi} + \frac{g}{r_x^2} GZ(\phi) = \xi_w \cos(\omega_e t) \tag{3}$$

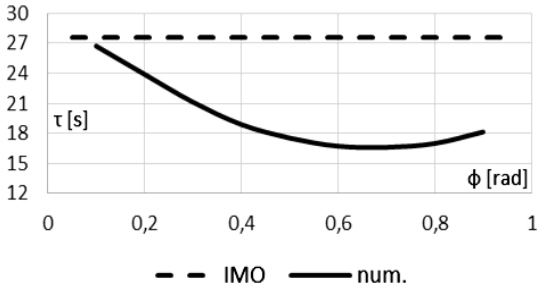
gdzie:

- ϕ – chwilowy kąt przechyłu statku,
- μ – współczynnik tłumienia,

r_x – poprzeczny promień bezwładności masy statku (z uwzględnieniem masy wody towarzyszącej),
g – przyspieszenie ziemskie,
GZ – ramię prostujące,
ξ_w – współczynnik wymuszenia,
ω_e – częstość wymuszenia (np. częstość spotkaniowa fali),
t – czas.

Należy zauważyć, że tłumienie kołysań bocznych zostało zapisane w równaniu (3) w postaci liniowej, podczas gdy w rzeczywistości jest ono opisywane członem nieliniowym. Jednakże badania przedstawione w pracy [9] jednoznacznie wskazują, że wpływ przyjętego modelu tłumienia jest ograniczony i z praktycznego punktu widzenia uzasadnione jest posługiwanie się modelem liniowym na potrzeby wyznaczania częstości kołysań własnych statku. Również zaawansowana technika wyznaczania okresu kołysań własnych na podstawie symulacji numerycznych CFD potwierdza poprawność przyjęcia modelu liniowego na potrzeby praktycznego ustalania tego okresu [8].

Wynik obliczeń okresu kołysań własnych przeprowadzonych z wykorzystaniem zależności (3), dla przykładowego statku przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Okres kołysań przykładowego statku wyznaczony za pomocą równań (1) i (2) – oznaczenie „IMO"oraz w toku symulacji numerycznych wykorzystujących równanie kołysań bocznych (3) – oznaczenie „num."

Fig. 2. *Natural period of roll of a sample ship obtained on the basis of the formulas (1) and (2) – marked "IMO" and in the course of numerical simulation based on the formula (3) – marked "num."*

Pomimo wyraźnych różnic w rezultatach obliczeń, uzyskiwanych przy wykorzystaniu formuły (1) i równania kołysań bocznych (3), wynikających z odmiennego sposobu modelowania momentu prostującego statek, należy zauważyć, iż wspólną cechą porównywanych podejść jest kluczowy wpływ parametrów stateczności ściowych statku na wartość okresu kołysań bocznych. Ma to istotne znaczenie dla unikania rezonansu kołysań bocznych statku, gdyż obok stosowanej współcześnie możliwości zmiany kursu i prędkości statku można zaproponować alternatywną metodę wyjścia ze strefy rezonansu poprzez intencjonalną modyfikację stateczności poprzecznej.

Możliwość taka byłaby szczególnie ważna dla statków ro-ro, które w znacznej części żeglują na dość krótkich liniach i to wedle ściśle przestrzeganego rozkładu zawinięć. Zmiana kursu takiego statku wiąże się zatem z zakłóceniem dość skomplikowanego procesu transportowego obejmującego także pasażerów oczekujących na rejs powrotny. Na krótkiej trasie statek nie będzie miał bowiem szans na odrobienie opóźnienia, wywołanego zmianą kursu bądź redukcją prędkości, podyktowaną koniecznością uniknięcia rezonansu kołysań bocznych. W związku z tym wprowadzenie alternatywnej metody unikania tego niebezpiecznego zjawiska, niewymagającej zmiany wektora ruchu statku albo ograniczającej tę zmianę, wydaje się obiecujące.

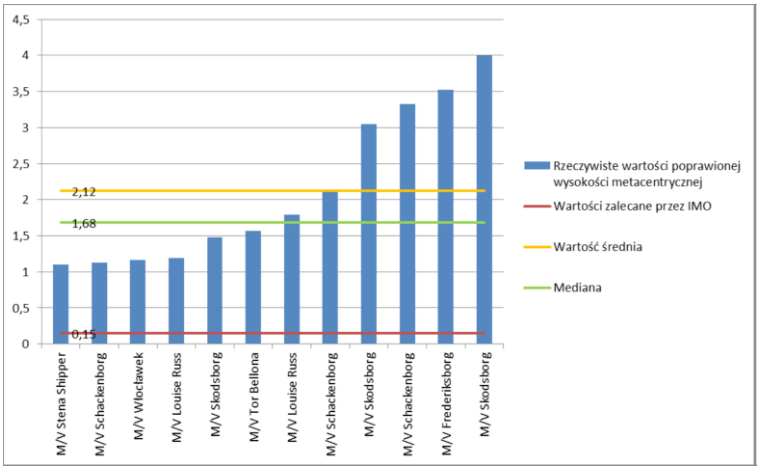
2. OCENA ZAPASU STATECZNOŚCI STATKÓW RO-RO W EKSPLOATACYJNYCH STANACH ZAŁADOWANIA

Procedura unikania rezonansu kołysań bocznych statków, w szczególności statków ro-ro pływających na relatywnie krótkich liniach, poprzez zastąpienie zmiany kursu i prędkości zmianą parametrów stateczności owych wymaga oceny realności jej zastosowania w kontekście zapasu stateczności statków ro-ro w typowych stanach eksploatacyjnych. Zazwyczaj poprawienie stateczności podczas rejsu jest trudne do zrealizowania, a przynajmniej trudne bez pogorszenia innych właściwości statku. Można sobie wyobrazić przyjęcie dodatkowego balastu do zbiorników dna podwójnego, jednak zabieg taki można zastosować wyłącznie wówczas, gdy statek w danym rejsie nie wykorzystuje w pełni swojej nośności, a i tak niepożądanym efektem ubocznym będzie wzrost powierzchni zwilżonej kadłuba i tym samym wzrost oporu lepkościowego skutkujący spadkiem prędkości bądź zwiększeniem zużycia paliwa. Wzrost parametrów stateczności owych należy więc uznać za mało realistyczny. Pozostaje zatem rozważenie przeciwstawnej możliwości, czyli intencjonalnego obniżenia parametrów stateczności owych statku w celu uzyskania możliwości kształtowania w pewnym zakresie wartości wysokości metacentrycznej i tym samym wpływania na położenie stref rezonansowych.

W celu określenia możliwości zmniejszenia parametrów stateczności owych statków morskich przyjęto założenie, że istnieje realna możliwość takiej modyfikacji poprzez usunięcie balastu ze zbiorników dna podwójnego bądź wprowadzenie swobodnych powierzchni cieczy w zbiornikach (obniżając tym samym tzw. poprawioną wysokość metacentryczną), o ile zapas stateczności statku jest wystarczający, aby spełnić kryteria stateczności owe. W tym kontekście kluczowe jest zbadanie, jak kształtują się typowe stany załadowania statków ro-ro w aspekcie uzyskiwanych parametrów stateczności owych i wspomnianego zapasu stateczności.

Zebrano dane odnośnie do rzeczywistych stanów eksploatacyjnych statków, które to dane ze statków raportowane były w ciągu kilku ostatnich lat, a na potrzeby opisywanej analizy wyselekcjonowano wyłącznie informacje dotyczące statków ro-ro. Pod uwagę wzięto wszystkie podstawowe miary stateczności występujące we współczesnych kryteriach oceny stateczności [4].

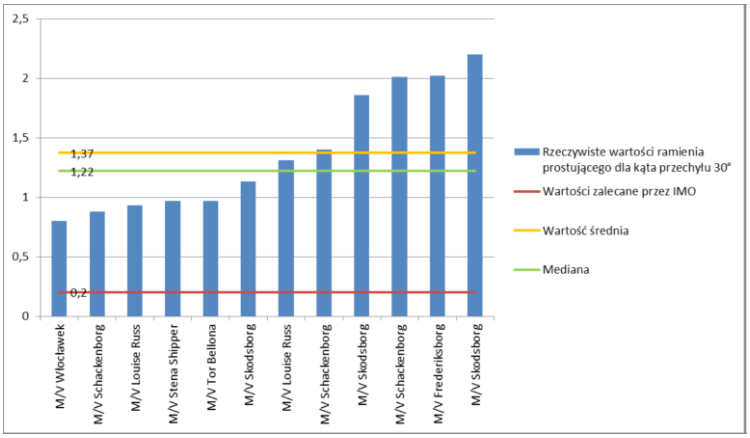
Jedną z podstawowych miar stateczności statku jest wysokość metacentryczna, poprawiona o wpływ swobodnych powierzchni cieczy. Dla zebranych danych wykreślono raportowane wartości *GMp* oraz wyznaczono wartość średnią i medianę w zestawieniu z wartością kryterialną 0,15 m, co przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Wartości poprawionej wysokości metacentrycznej zgodnie z zebranymi raportami dla statków ro-ro

Fig. 3. *Metacentric height corrected for the free surface effect – data according to reports collected on board ro-ro ships*

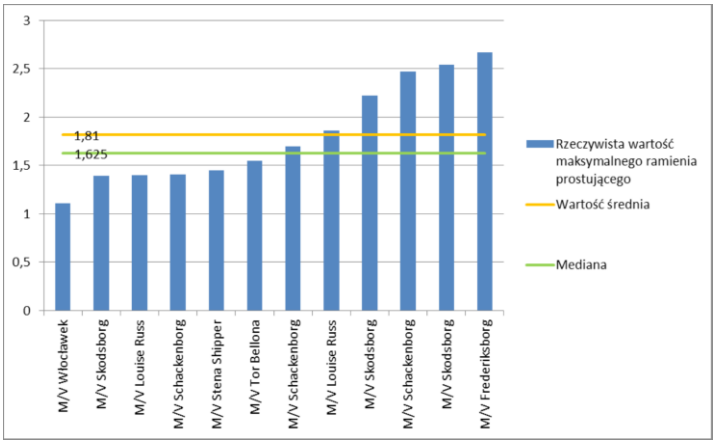
Następnie wykonano analizę parametrów charakteryzujących stateczność statku dla dużych kątów przechyłu, co przedstawiono na rysunku 4. Zebrano wartości ramienia prostującego dla kąta przechyłu statku równego 30 stopni, co koresponduje z jednym z kryteriów oceny stateczności.



Rys. 4. Wartości ramienia prostującego przy kącie przechyłu 30 stopni

Fig. 4. *Righting arm at the angle of heel equal 30 degrees*

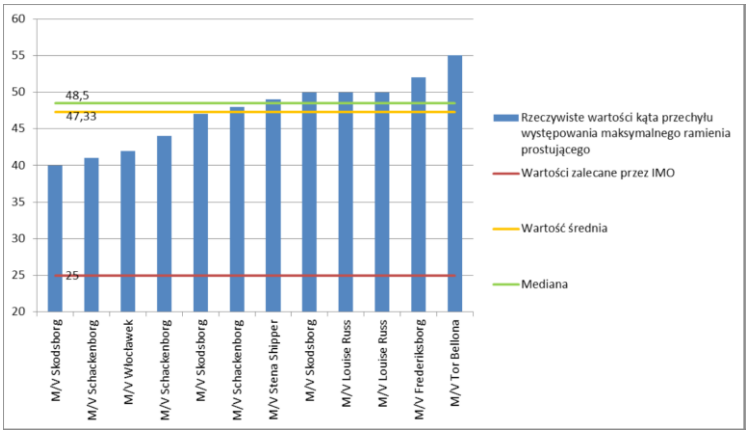
Kolejną zestawioną wielkością charakterystyczną jest wartość maksymalna ramienia prostującego, bezpośrednio odnosząca się do maksymalnego momentu przechylającego, któremu statek może się przeciwstawić w danym stanie załadowania. Zebrane dane przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Wartości maksymalne ramienia prostującego

Fig. 5. *Maximum value of righting arm*

Z punktu widzenia bezpieczeństwa statku istotny jest również kąt występowania maksymalnej wartości ramienia prostującego, co przedstawia rysunek 6.



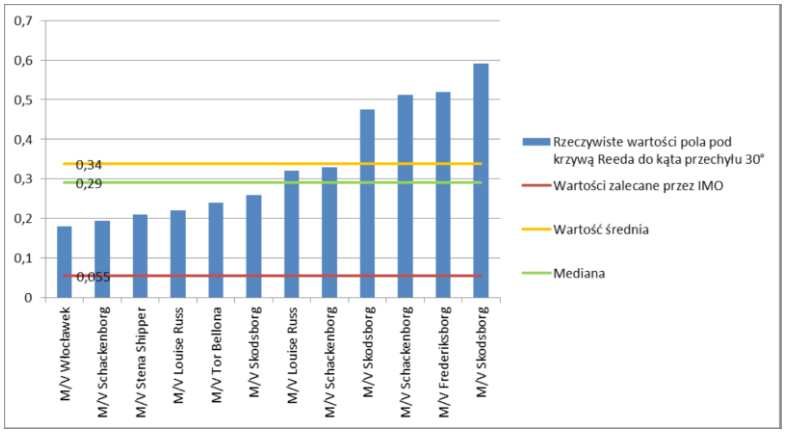
Rys. 6. Kąt przechyłu statku, przy którym występuje maksymalne ramię prostujące

Fig. 6. *Angle of heel of the maximum value of righting arm*

Zaprezentowane na rysunku 6 dane wskazują na istotny aspekt analizowanych charakterystyk statecznościowych. Zalecany w Kodeksie Stateczności Statku Nieuszkodzonego kąt występowania maksimum krzywej Reeda wynosi 30 stopni, a minimalnie wymagany – 25 stopni. Kąt ten określa przechył statku, po którego osiągnięciu ramię prostujące zaczyna maleć, więc z punktu widzenia statyki jest to

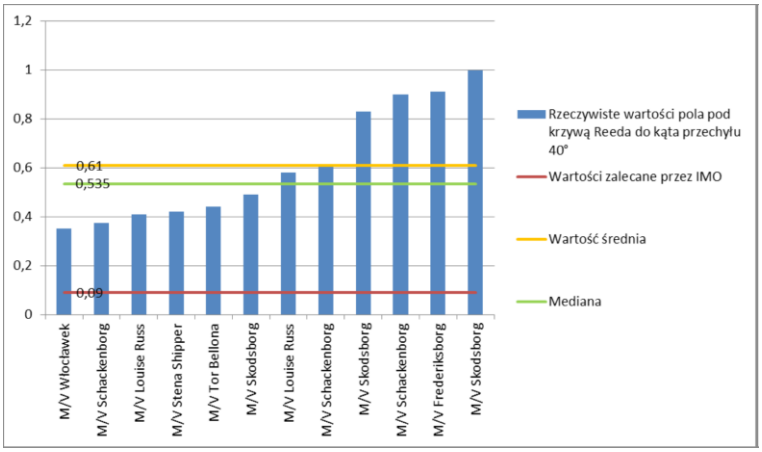
maksymalny kąt przechyłu wywołanego zewnętrznym momentem przechylającym, przy którym statek jeszcze się nie przewróci. Zgromadzone dane wskazują jednak na bardzo znaczne przekroczenie wymogów minimalnych w każdym z raportowanych stanów załadowania.

Ostatnia grupa analizowanych wielkości niesie informację o zapasie stateczności statku w ujęciu dynamicznym, gdyż dotyczy pól pod krzywą ramion prostujących, co przedstawiono na rysunkach 7, 8 i 9. Pola te interpretowane są jako praca jednostkowa (odniesiona do 1 tony masy statku), potrzebna do przechylenia statku w zadanym przedziale kątów. Stąd kryteria stateczności normujące pole pod krzywą Reeda są szczególnie istotne z punktu widzenia dynamicznych zjawisk zachodzących na sfalowanym morzu, w tym dla kołysania bocznego.



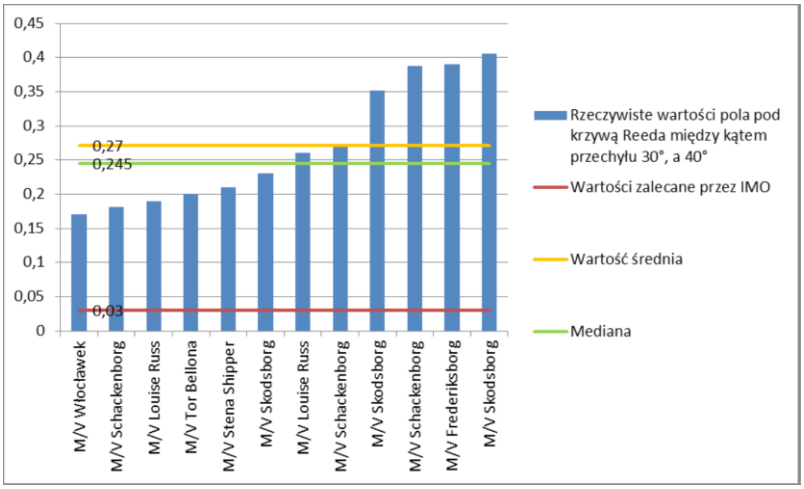
Rys. 7. Pole pod krzywą ramion prostujących w zakresie kątów przechyłu od 0 do 30 stopni

Fig. 7. *Area under the righting arm curve from an angle of heel 0 up to 30 degrees*



Rys. 8. Pole pod krzywą ramion prostujących w zakresie kątów przechyłu od 0 do 40 stopni

Fig. 8. *Area under the righting arm curve from an angle of heel 0 up to 40 degrees*



Rys. 9. Pole pod krzywą ramion prostujących dla kątów przechyłu od 30 do 40 stopni

Fig. 9. *Area under the righting arm curve from an angle of heel 30 up to 40 degrees*

Przedstawione rezultaty wykonanych badań jednoznacznie wskazują, że wszystkie typowe raportowane stany eksploatacyjne statków ro-ro charakteryzują się parametrami statecznościowymi znacznie przekraczającymi wartości kryterialne zgodne z Kodeksem Stateczności Statku Nieuszkodzonego [5]. W przypadku poprawionej wysokości metacentrycznej w ponad połowie stanów załadowania wartość *GMp* była nawet jedenastokrotnie większa niż minimalnie wymagana, natomiast ramię prostujące dla kąta przechyłu statku wynoszącego 30 stopni w ponad połowie stanów było ponadsześciokrotnie większe od wartości kryterialnej. Maksymalne wartości ramienia prostującego również wskazują na duży zapas stateczności badanych statków. Stateczność dynamiczna normowana poprzez wymaganie odpowiedniego pola pod krzywą stateczności statycznej również bardzo znacząco przekracza wymogi Kodeksu ISC. Pola pod krzywą ramion prostujących zarówno dla zakresu kątów przechyłu 0–30°, jak i 0–40° są w połowie analizowanych stanów załadowania ponadpięciokrotnie większe od wartości kryterialnych.

PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano niestosowaną dotychczas metodę wyjścia ze stref rezonansu kołysań bocznych statku żeglującego na sfalowanym morzu. W związku z opisaną zależnością warunków wystąpienia rezonansu od parametrów statecznościowych statku zaproponowano działania powodujące kontrolowane pogorszenie stateczności w celu uzyskania rozstrojenia częstości kołysań własnych statku z częstością spotkaniową fali, będącą częstością wymuszenia. Można wówczas zrezygnować bądź znacząco ograniczyć konieczność redukcji prędkości statku bądź

zmiany jego kursu, co byłoby szczególnie korzystne na statkach ro-ro z powodu wymogów żeglugi regularnej na relatywnie krótkich trasach.

Zastosowanie proponowanej metody unikania rezonansu kołysań bocznych uzależnione jest jednak od zapasu stateczności statków ro-ro w typowych eksploatacyjnych stanach załadowania. Zagadnienie to zbadano na podstawie danych raportowanych z rzeczywistych statków podczas normalnej eksploatacji. Wykazano, że we wszystkich badanych przypadkach charakterystyki stateczno-ściowe bardzo znacznie przekraczały minimalnie wymagane wartości kryterialne zgodne z Kodeksem Stateczności Statku Nieuszkodzonego. Wnioski takie dotyczą zarówno stateczności początkowej, jak i stateczności dla dużych kątów przechyłu oraz dla stateczności dynamicznej. Pozwala to na bezpieczne ograniczenie stateczności w pewnym zakresie w celu uzyskania rozstrojenia częstości kołysań własnych z częstością spotkaniową fali. Statki ro-ro są zatem podatne na modyfikacje parametrów statecznościowych traktowane jako czynnik poprawy bezpieczeństwa. We współczesnym podejściu do bezpieczeństwa żeglugi nie należy bowiem stosować zasady mówiącej, że czym większa jest stateczność statku, tym bezpieczniej. Zaproponowana w artykule metoda kładzie nacisk na utrzymywanie stateczności nie jak największej, ale odpowiednio dobranej do aktualnych warunków żeglugowych. Z postulatu takiego wynika wprost konieczność zdynamizowania procesu oceny stateczności statku w miejsce dotychczasowego podejścia statycznego, zamykającego kwestię oceny stateczności na etapie sprawdzenia kryteriów przed wyjściem statku w rejs.

Wdrożenie koncepcji dynamicznej modyfikacji stateczności statków ro-ro w czasie trwania rejsu jest realnie możliwe i pożądane ze względu na relatywnie częstsze przypadki uszkodzenia części ładunku wskutek wystąpienia rezonansowych kołysań bocznych. Zarazem celowe jest kontynuowanie badań w tym kierunku.

LITERATURA

1. Belenky V., Bassler C., Spyrou K., *Development of Second Generation Intact Stability Criteria*, NSWCCD-50-TR-2011/065, 2011.
2. Francescutto A., *Intact Ship Stability - the Way Ahead*, Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York 2002.
3. *Heavy weather*, The Swedish Club, Gothenburg 2014.
4. IMO, *International Code on Intact Stability 2008, edition 2009*, International Maritime Organization, MSC.267(85), London 2009.
5. IMO, *Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions*, International Maritime Organization, MSC.1/Circ.1228, London 2007.
6. Kobyliński L., Kastner S., *Stability and Safety of Ships, Vol. 1: Regulation and Operation*, Elsevier Ocean Engineering Books, Vol. 9, 2003.
7. Krata P., *Ewaluacja próby kołysań bocznych jako metody wyznaczania wysokości metacentrycznej statku*, „Logistyka”, 2010, nr 4.

8. Krata P., Jachowski J., *Virtual ship's roll decay test with the use of CFD technique*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 23, 2016, No. 2, s. 215–221.
9. Krata P., Wawrzyński W., *Prediction of the natural frequency of ship's roll with regard to various models of roll damping*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 23, 2016, No. 3, s. 289–296.
10. Umeda N., *Current status of Second Generation Intact Stability Criteria Development and Some Recent Efforts*, Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, Brest 2013.
11. Wawrzyński W., Krata P., *Method for ship's rolling period prediction with regard to non-linearity of GZ curve*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics (JTAM), Vol. 4, No. 54, 2016, s. 1329–1343.
12. Wawrzyński W., Krata P., *On ship roll resonance frequency*, Ocean Engineering, Vol. 126, November 2016, s. 92–114.
13. Womack J.: *Small commercial fishing vessel stability analysis, where are we now? Where are we going?* Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York 2002.

Źródła internetowe

14. http://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type/ (dostęp: 05.2016).

ASSESSMENT OF STABILITY OF RO-RO SHIPS IN TYPICAL OPERATIONAL LOADING CONDITIONS FOCUSED ON SYNCHRONOUS ROLLING AVOIDANCE

Summary

In this paper ship's synchronous rolling is considered, which is a significant factor influencing safety of navigation in rough sea conditions. The transverse stability characteristics are emphasized in terms of ship vulnerability to resonance rolling. Then an assessment of stability of Ro-Ro ships is carried out on the basis of collected data regarding their typical operational loading conditions. The feasibility of intended modification of stability characteristics of vessels underway is examined as a mean of the resonance zone exit instead of alternation of ship speed and course. The initial metacentric height is taken into account as well as the righting arm for large angles of heel. The dynamic stability represented by the area under the GZ curve is considered too. The research leads to the conclusion that Ro-Ro ships in their typical operational loading conditions reveal a massive stability margin allowing for the practical application of the proposed method. There is a room for modification of the stability characteristics to avoid synchronous rolling without excessive alternation of ship speed and course.

Keywords: *ship stability, synchronous rolling, modeling of natural period of roll.*