

ZMIANY RAMIENIA PROSTUJĄCEGO W ZJAWISKU CZYSTEJ UTRATY STATECZNOŚCI STATKU NA FALI

Streszczenie

W artykule przedstawione zostało zjawisko czystej utraty stateczności statku na fali. Zaprezentowano wyniki obliczeń wynikające z modelu defektu statecznościowego utraty stateczności statku na fali dla kryteriów oceny stateczności drugiej generacji. Przeanalizowano zmiany ramienia prostującego statku na fali dla różnych położań grzbietu fali względem kadłuba statku i wybranych stanów załadowania statku. Wyniki obliczeń wykonanych oprogramowaniem Maxsurf/Hydromax zaprezentowano na załączonych wykresach.

WSTĘP

Podstawowymi parametrami w ocenie stateczności zgodnie z kodeksem stateczności statków w stanie nieuszkodzonym IS Code 2008 są: ramię prostujące GZ statku oraz początkowa wysokość metacentryczna GM. Parametry te są ściśle związane z pionowym położeniem środka ciężkości statku i spełnienie wartości kryterialnych w myśl obowiązujących przepisów podczas eksploatacji zależy głównie od sytuowania środka ciężkości KG. Parametry te są obliczane dla statku znajdującego się na wodzie spokojnej tzn. kiedy wodnicę pływania statku można wyrazić nieodkształconą płaszczyzną. W rzeczywistości, kiedy statek porusza się, a falowanie morskie wymusza zmianę położenia równowagi statku, dochodzi do sytuacji, kiedy statek znajduje się kolejno na grzbiecie i w dolinie fali (oraz we wszystkich stanach pośrednich w czasie przejścia fali wzdłuż kadłuba statku). Sytuacja ta powoduje chwilowe zmiany podwodnej części kadłuba, co skutkuje zmianą aktualnej wodnicy statku. Wywołuje to dalsze zmiany w postaci momentów bezwładności wodnicy, pola powierzchni, położenia środka wyporu i innych parametrów związanych z kształtem podwodnej części kadłuba. Ostatecznie znacząco wpływa to na wartości ramienia prostującego GZ i początkowej wysokości metacentrycznej GM. Najniekorzystniejsza sytuacja występuje kiedy statek znajduje się na grzbiecie fali a długość fali jest porównywalna z długością statku [2]. Niekorzystana zmiana wartości ramienia prostującego GZ (zmniejszenie) jest w przybliżeniu proporcjonalna do wysokości fali na której grzbiecie znalazł się kadłub statku. Zmniejszenie wartości ramienia prostującego i zarazem początkowej wysokości metacentrycznej nazywane jest czystą utratą stateczności statku na fali. Analizując to zjawisko rozpatruje się najczęściej najbardziej niekorzystną sytuację dla bezpieczeństwa statecznościowego statku w warunkach gdy:

- kierunek rozchodzenia się fali jest zgodny z kierunkiem ruchu statku (fala nadążająca lub przeciwna),
- prędkość statku równa prędkości fali – przy fali nadążającej,
- długość fali równa długości statku,
- znaczna wysokość znacząca fali.

1. MOMENT PROSTUJĄCY STATKU NA FALI

Istotą stateczności statku jest zdolność do przeciwstawiania się przez statek zewnętrznym momentom przechylającym, poprzez powstający podczas przechylania moment prostujący. Na wodzie spokojnej moment prostujący wynika z ciśnień hydrostatycznych działających na zwilżoną powierzchnię kadłuba przechylonego statku (dla danego kąta przechyłu moment prostujący na wodzie spokojnej jest niezależny od czasu). Natomiast na sfalowanej wo-

dzie dodatkowo pojawiają się ciśnienia hydrodynamiczne od fali niezakłóconej i od zaburzeń, jakie wprowadza statek do fali. Podczas pływania po sfalowanej wodzie powstają od kołysań także ruchy względne statku a tym samym chwilowe zmiany objętości i kształtu zwilżonej części kadłuba statku oraz zmiany charakterystyk geometrycznych, od których zależy moment prostujący. Czynniki te powodują, że podczas pływania statku na fali moment prostujący zależy dodatkowo od czasu. W przybliżeniu można przedstawić go jako sumę momentu prostującego na wodzie spokojnej i poprawek wynikających z oddziaływania fali [2], [8]:

$$M_R(\Phi, t) = M_{R0}(\Phi) + \delta M_{R1}(\Phi, t) + \delta M_{R2}(\Phi, t) + \delta M_{R3}(\Phi, t), \quad (1)$$

gdzie:

- $\delta M_{R0}(\Phi, t)$ – moment prostujący na wodzie spokojnej,
- $\delta M_{R1}(\Phi, t)$ – poprawka wynikająca z uwzględnienia sił odśrodkowych, które występują na skutek udziału statku w ruchu orbitalnym cząstek wody w fali,
- $\delta M_{R2}(\Phi, t)$ – poprawka uwzględniająca wpływ zmian objętości podwodzia wywołanych względnymi kołysaniami (w szczególności nurzaniami),
- $\delta M_{R3}(\Phi, t)$ – poprawka wynikająca ze zmian kształtu podwodzia wywołanego falowaniem (zmiana kształtu podwodzia powoduje zmianę bezwzględnej wartości ramion prostujących),
- Φ – kąt przechyłu statku na fali,
- t – czas.

Siła odśrodkowa powoduje zmianę zanurzenia statku (zanurzenie statku w dolinie fali i wynurzenie na grzbiecie). Na regularnej fali bocznej poprawka δM_{R1} może być aproksymowana wyrażeniem

$$\delta M_{R1} \approx W \cdot l(\Phi) \cdot \frac{\delta_1 h_0}{h_0} \quad (2)$$

gdzie:

$$\delta_1 h_0 = h_0 \alpha_A \cos(\omega_E t) \quad (3)$$

W – wypór statku,

$l(\Phi)$ – ramię prostujące na wodzie spokojnej przy kącie przechyłu Φ ,

h_0 – początkowa, poprzeczna wysokość metacentryczna na wodzie spokojnej,

α_A – amplituda kąta skłonu fali regularnej,

ω_E – częstość spotkaniowa na fali regularnej

Zmiany objętości podwodzia, wywołane względnymi kołysaniami statku można aproksymować wyrażeniem [2], [8]:

$$\delta M_{R2} \approx \frac{\delta(W \cdot h_0)}{h_0} I(\Phi) = \frac{W \delta_2 h_0 + h_0 \delta W}{h_0} I(\Phi), \quad (4)$$

gdzie:

$\delta_2 h_0$ – zmiany początkowej wysokości metacentrycznej wywołane zmianami małego promienia metacentrycznego i zmianami rzędnej środka wyporu,

δW – zmiany wyporu wywołane względnymi kołysaniami.

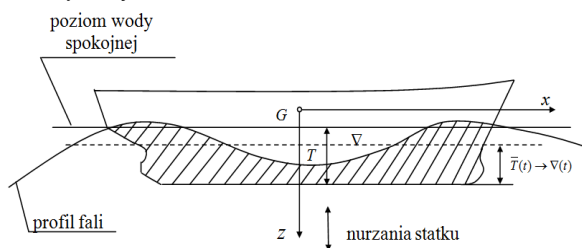
Zmiana momentu prostującego, wywołana zmianami kształtu podwodzia statku, na fali wzdłużnej może być aproksymowana wyrażeniem:

$$\delta M_{R3} \approx -W h_{A0} \Phi \cos(\omega_E t + \varepsilon_h), \quad (5)$$

gdzie:

h_{A0} – amplituda zmian początkowej wysokości metacentrycznej,

ε_h – przesunięcie fazowe pomiędzy falą a zmianami wysokości metacentrycznej.



Rys. 1. Zmian kształtu i objętości podwodzia kadłuba statku przy położeniu na fali [8]

gdzie:

T, Δ – zanurzenie i objętość podwodzia statku na wodzie spokojnej,

$\bar{T}(t)$ – średnie chwilowe zanurzenie statku na fali,

obszar zakreskowany – chwilowy kształt i objętość $\Delta(t)$ podwodzia statku na fali.

Wymienione poprawki δM_{R1} , δM_{R2} , δM_{R3} momentu prostującego, dla statku o określonym stanie załadowania i płynącego z prędkością V pod kątem β_w w stosunku do kierunku fali, można uzależnić od parametrów fali regularnej tj. od amplitudy ζ_A i częstotliwości ω lub długości λ . Wartość tych poprawek będzie się zmieniać oscylacyjnie w czasie, tak jak zmienia się wartość rzędnej fali regularnej, która wywołuje te poprawki

Zmiany momentu prostującego, dane równaniem, statku na fali regularnej sprowadzają się głównie do zmian objętości i kształtu podwodzia. Konsekwencją tych zmian są oczywiście zmiany charakterystyk geometrycznych i stąd krzywa ramion prostujących zmienia swoje wartości w funkcji czasu t dla danego kąta przechyłu ϕ , w przedziale od wartości maksymalnej (kiedy statek jest w dolinie fali) do wartości minimalnej (statek na grzbiecie fali).

Ponieważ pomiędzy krzywą ramion prostujących a wysokością metacentryczną istnieje określony związek, to zmiany krzywej ramion można w przybliżeniu zastąpić pewną „wirtualną” wysokością metacentryczną, której wartości maksymalne i minimalne będą oscylować wokół wartości h_0 jak dla wody spokojnej. Chwilowa wartość „wirtualnej” wysokości metacentrycznej będzie więc równa [8]:

$$h_{0w}(t) = h_0 + \Delta h_w(t) \quad (6)$$

Gdzie: $\Delta h_w(t)$ są zmianami w czasie wysokości metacentrycznej statku na fali. Amplituda oscylacji wysokości metacentrycznej Δh_w będzie także zależała od parametrów statku (stan załadowania, prędkość V i kierunek ruchu względem fali β_w) i od fali regularnej wywołującej kołysania statku: amplitudy ζ_A i długości λ (lub częstotliwości ω) [8].

2. CZYSTA UTRATA STATECZNOŚCI

Podany poniżej projekt oceny podatności statku na czystą utratę stateczności [6] ma zastosowanie do statków 24 m lub większych, a badana prędkość statku wyrażona liczbą Frouda spełnia poniższą zależność:

$$F_N > F_{NCL} \quad (7)$$

$$F_N = \frac{F_S}{\sqrt{gL}} \quad (8)$$

gdzie:

F_N – liczba Frouda wyrażająca prędkość statku [-],

F_{NCL} – liczba Frouda wyrażająca prędkość nominalną (serwisową).

W myśl założeń metody $F_{NCL} = 0,2$ [-],

L – długość statku [m],

g – przyspieszenie ziemskie, 9,81 [m/s²].

Przetawione poniżej poziomy na podstawie dokumentu [6], zakładają ocenę początkowej wysokości metacentrycznej GM statku na grzbiecie fali (i stanach pośrednich) oraz wartości ramienia prostującego GZ statku przy udziale szeregu fal regularnych, których model przedstawiony zostały w publikacjach [3], [6]. Poziom pierwszy zakłada ocenę początkowej wysokości metacentrycznej GM w sytuacji gdy statek znajduje się na grzbiecie fali o długości równej długości statku i określonej stromości wyrażonej współczynnikiem S_w . Zakwalifikowanie statku jako podanego na czystą utratę stateczności na poziomie pierwszym następuje gdy obliczona w podany sposób GM_{min} jest mniejsza niż wyraża to wartość standardu na tym poziomie.

Drugi poziom podatności na czystą utratę stateczności statku dotyczy parametrów związanych z przebiegiem krzywej ramion prostujących statku w różnych położeniach względem fali. Badane parametry to:

- zakres dodatnich ramion prostujących – kąt przechyłu statku dla którego pojawiają się wartości ujemne GZ ,
- kąt przechyłu statku spowodowany ujemną początkową wysokością metacentryczną,
- wartość maksymalna ramienia prostującego.

Wykorzystywany do analizy model falowania przedstawiony w pracach [3] i [6] to 16 fal regularnych o określonych parametrach (długość, wysokość znacząca, stromość) oraz współczynnik wagowy przypisany do danej fali, co wyraża również w pewien sposób prawdopodobieństwo wystąpienia danej fali i doznania przez statek w danych okolicznościach defektu statecznościowego. Wnioskowanie oprócz współczynników wagowych opiera się na wartościach logicznych 0 i 1 kwalifikujących lub odrzucających statek z ocenianego zagrożenia (dla danej fali). Podejście takie – współczynniki wagowe jest w pewnym sensie ujęciem probabilistycznym. Obliczenia na poziomie drugim powinny uwzględniać różne położenia grzbietu fali względem kadłuba statku (co 0,1 długości statku L), oraz swobodne przegłębienie i zanurzenie się statku (wyznaczanie położenia równowagi statku dla różnych sytuacji grzbietu fali względem kadłuba statku). Zakwalifikowanie statku do poziomu

trzeciego (uznanie podatności na badane zjawisko) następuje gdy suma współczynników wagowych (wartość największa z trzech wymienionych wyżej parametrów) będzie większa niż wartość wyrażona współczynnikiem będąca standardem dla poziomu 2.

2.1. Poziom 1 kryterium podatności statku na czystą utratę stateczności

W myśl założeń metody statek na etapie 1 kryterium nie będzie podatny na tzw. defekt statecznościowy w postaci czystej utraty stateczności gdy spełniona będzie poniższa nierówność:

$$GM_{\min} > R_{PLA} \quad (9)$$

gdzie:

R_{PLA} – wskaźnik służący do oceny kryterium 1 poziomu, (standard poziomu pierwszego),

GM_{\min} – wartość minimalna początkowej wysokości metacentrycznej statku na fali.

Wskaźnik R_{PLA} zgodnie z założeniami metody przyjmuje wartość $R_{PLA} = 0,05$ [m] lub obliczany jest wzorem poniższym w zależności, która z wartości jest mniejsza.

$$R_{PLA} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,83d(F_N)^2 \\ 0,05 \end{array} \right. [m] \quad (10)$$

gdzie:

d – zanurzenia statku wynikające ze stanu załadowania,

F_N – liczba Frouda obliczona dla aktualnej prędkości statku.

Wartość początkowej wysokości metacentrycznej GM_{\min} może zostać wyrażona na podstawie obliczeń numerycznych dla pełnego przejścia fali wzdłuż kadłuba statku lub wzorem nr 11, gdy spełniony jest warunek dotyczący kształtu burt statku, co wyraża wzór nr 12.

$$GM_{\min} = KB + \frac{I_L}{V} - KG0,06[m] \quad (11)$$

$$\frac{V_D - V}{A_w(D - d)} \geq 1,0 \quad (12)$$

gdzie:

d – zanurzenie statku odpowiadające analizowanemu stanowi załadowania,

I_L – poprzeczny moment bezwładności wodnicy obliczony dla zanurzenia d_L - wzór nr (7),

KB – pionowe położenie środka wyporu statku wynikające z analizowanego stanu załadowania,

V – objętość podwodnej części kadłuba statku dla analizowanego stanu załadowania,

D – wysokość boczna statku,

V_D – objętość podwodnej części kadłuba odpowiadająca zanurzeniu równemu wysokości bocznej statku,

A_w – pole powierzchni wodnicy statku dla zanurzenia odpowiadającego analizowanemu stanowi załadowania.

$$d_L = d - \delta d_L \quad (13)$$

$$\delta d_L = \min \left(d - 0,25d_{full}, \frac{LS_w}{2} \right) \quad (14)$$

gdzie:

S_w – współczynnik stromości fali przyjęty zgodnie z metodą jako wartość 0,0334[-],

d_L – zanurzenie dla którego obliczany jest poprzeczny moment bezwładności wodnicy [m],

δd_L – różnica, o jaką należy pomniejszyć w obliczeniach zanurzenie wynikające ze statku załadowania statku. Jest to wartość najmniejsza z dwóch przedstawionych we wzorze nr 14 [m],

L – długość statku [m].

Jak wspomniano powyżej numeryczne obliczenia GM_{\min} można dokonać także dla pełnego przejścia fali wzdłuż kadłuba statku biorąc pod uwagę nowe położenia równowagi statku wynikające z położenia kadłuba statku względem grzbietu fali. Wyniki obliczeń powinny być podane dla każdego sytuowania grzbietu fali względem kadłuba licząc od dziubu do rufy co 0,1 długości statku.

2.2. Poziom 2 kryterium podatności statku na czystą utratę stateczności

Na poziomie drugim opisywanej metody oceniany statek nie będzie podatny na czystą utratę stateczności gdy największa z wartości trzech współczynników CR_1 , CR_2 , CR_3 (wzór nr 17) wynikających z kształtu krzywej ramion prostujących będzie mniejsza niż wartość kryterialna wyrażona współczynnikiem R_{PLO} – wzór nr 15. Współczynnik R_{PLO} przyjmuje zgodnie z założeniami metody wartość wyrażoną wzorem nr 16.

$$CR_{\max} < R_{PLO} \quad (15)$$

$$R_{PLO} = 0,06[m] \quad (16)$$

$$CR_{\max} = \max \begin{cases} CR_1 \\ CR_2 \\ CR_3 \end{cases} \quad (17)$$

Zgodnie z założeniami przyjętej metody współczynniki obliczane są następująco:

$$CR_1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i - \text{wsp.wagowy1} \quad (18)$$

$$CR_2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i - \text{wsp.wagowy2} \quad (19)$$

$$CR_3 = \sum_{i=1}^N W_i C3_i - \text{wsp.wagowy3} \quad (20)$$

gdzie:

W_i – współczynnik wagowy dla danego modelu fali zgodnie z wytycznymi w publikacji [6]

i – numer kolejnej fali,

N – liczba analizowanych fal,

CR_1 – współczynnik nr 1 wynikający z wzoru nr 18,

CR_2 – współczynnik nr 2 wynikający z wzoru nr 19,

CR_3 – współczynnik nr 3 wynikający z wzoru nr 20.

Współczynnik $C1_i$ dotyczy kąta przechyłu statku, przy którym zanikają dodatnie ramiona prostujące statku wynikające z analizowanego stanu załadowania dla danego modelu fali. Wyniki obliczeń powinny być analizowane dla każdego sytuowania grzbietu fali względem kadłuba licząc od dziubu do rufy co 0,1 długości statku szczególnie zaś dla położenia grzbietu fali w miejscu gdzie sytu-

owane jest wzdłużne położenie środka ciężkości. Współczynnik $C1_i$ obliczany jest wzorem nr 21 i przyjmuje on logiczne wartości 0 lub 1. Wartość 1 współczynnika występuje w sytuacji gdy najmniejsza z wartości kąta przechyłu statku, przy którym występują ujemne wartości ramienia prostującego jest mniejsza niż wartość kryterialna R_{PL1} opisana wzorem nr 22. Wartość kąta φ_v uzyskiwana jest dla pełnego przejścia grzbietu fali wzdłuż kadłuba statku co 0,1 długości statku.

$$C1_i = \begin{cases} 1 & \varphi_v < R_{PL1} \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases} \quad (21)$$

$$R_{PL1} = 30[^\circ] \quad (22)$$

gdzie:

φ_v – kąt przechyłu statku, przy którym pojawiają się ujemne wartości ramienia prostującego,

R_{PL1} – współczynnik kryterialny nr 1.

Współczynnik $C2_i$ (wzór nr 23) dotyczy kąta stałego przechyłu statku φ_{loll} spowodowanego ujemną wartością początkowej wysokości metacentrycznej (*ang. angle of loll*). Wartość logiczną 1 przyjmuje w sytuacji gdy wartość wspomnianego kąta przechyłu przekracza wartość wyrażoną współczynnikiem R_{PL2} wzór nr 24. Warunki uzyskania wartości kąta φ_{loll} (przejście grzbietu fali wzdłuż kadłuba statku) takie same jak w opisie dla współczynnika CR_1 .

$$C2_i = \begin{cases} 1 & \varphi_{loll} > R_{PL2} \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases} \quad (23)$$

$$R_{PL2} = 25[^\circ] \quad (24)$$

gdzie:

φ_{loll} – kąt przechyłu statku spowodowany ujemną wartością GM,

R_{PL2} – współczynnik kryterialny nr 2.

Kryterium dla współczynnika $C3_i$ dotyczy najmniejszej wartości maksymalnego ramienia prostującego statku GZ_{max} . Wartość współczynnika $C3_i$ obliczona wzorem nr 25 przyjmuje logiczną wartość 1 gdy wartość maksymalna wartość ramienia prostującego $GZ_{max}(m)$ jest mniejsza od wartości współczynnika R_{PL3} obliczonego wzorem nr 26. Warunki uzyskania wartości $GZ_{max}(m)$ (przejście grzbietu fali wzdłuż kadłuba statku) takie same jak w opisie dla współczynnika $C1_i$ i $C2_i$.

$$C3_i = \begin{cases} 1 & GZ_{max}(m) > R_{PL3} \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases} \quad (25)$$

$$R_{PL3} = 8 \left(\frac{H_i}{\lambda_i} \right) dFn^2 [m] \quad (26)$$

gdzie:

H – wysokość znacząca fali,

λ – długość fali,

d – zanurzenie statku wynikające z aktualnego stanu załadowania,

F_n – liczba Frouda wynikająca z prędkości statku wzór nr 2.

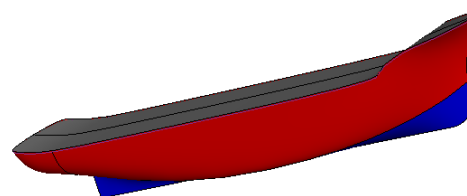
Zgodnie ze schematem przedstawionym w publikacji [3], [7] badanie podatności statku na możliwość wytopienia defektu statecznościowego jakim jest czysta utrata stateczności odbywa się w 3 etapach. Etap pierwszy i drugi zostało opisany w 2.1 i 2.2. oraz w publikacji [3], [6]. Poziom 3 po zakwalifikowaniu się statku do tego etapu (negatywna ocena na podatności statku dotycząca czystej utraty stateczności zarówno na pierwszym i drugim poziomie) polega na ocenie bezpośredniej danego statku. Ocenę bezpośrednio należy rozumieć jako dodatkowe badania modelowe i/lub obliczenia numeryczne modelem matematycznym kompleksowo opisującym w

tym przypadku czystą utratę stateczności. Skutkami takich obliczeń lub symulacji będą np.:

- zalecenia projektowe dotyczące np. kształtu kadłuba statku,
- wytyczne dla kapitana statku zebrane w postaci poradnika informującego w jakich sytuacjach (stany pogodowe, stany załadowania statku) może dojść do czystej utraty stateczności statku,
- informacje dotyczące zakresu przeszkolenia załogi pracujących na statku w obszarze możliwości wystąpienia wybranego defektu statecznościowego,
- inne zalecenia eksploatacyjne, powodujące, że statek nie będzie podatny ten rodzaj zagrożenia

3. OBLICZENIA DLA ZJAWISKA CZYSTEJ UTRATY STATECZNOSCI STAKU NA FALI

Do otrzymania wyników obliczeń przedstawionych w rozdziale wybrano model statku rybackiego „Trawler Pro” dostępny w bazie dołączonych do oprogramowania Maxsurf [9] gotowych modeli kadłubów statków. Podstawowe dane techniczno – eksploatacyjne statku przedstawia tabela nr 1



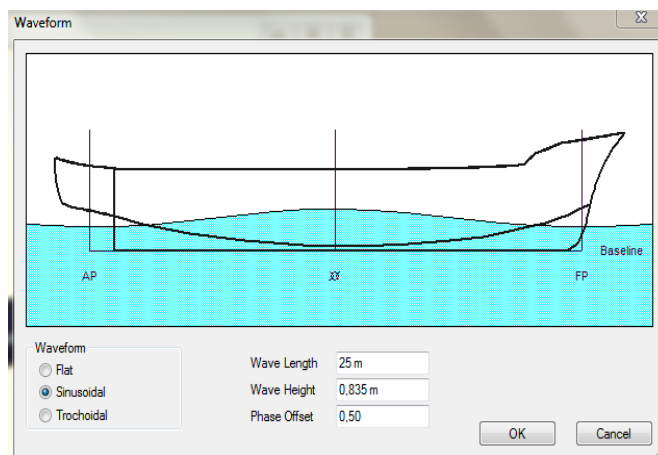
Rys. 2. Model kadłuba statku użytego do obliczeń [9]

Przy użyciu oprogramowania Hydromax/Maxsurf [9] biorąc pod uwagę typowy stan załadowania dla analizowanego statku obliczono wartości początkowej wysokości metacentrycznej GM i ramienia prostującego GZ dla wody spokojnej i przy różnych położeniach fali względem kadłuba statku.

Tab. 1. Dane techniczno – eksploatacyjne statku

Długość statku L [m]	25	Objętość podwodzia V [m ³]	128
Szerokość B [m]	5,7	Prędkość eksploatacyjna Vs [kn]	10
Zanurzenie d [m]	1,5	Wysokość boczna D [m]	3,2

W obliczeniach użyto stanu załadowania dla statku bez przechyłu i przegłębienia z pionowym położeniem środka ciężkości KG = 2 [m].



Rys. 3. Modelowanie parametrów fali oraz położenia grzbietu fali względem kadłuba w oprogramowaniu Maxsurf [9]

Pierwszym etapem obliczeń jest przyjęcie stanu załadowania i ustalenie prędkości statku. Prędkość statku użyta w obliczeniach wynosi 10 [kn] co równie jest 5,14 [m/s]. Następnie obliczono na tej podstawie liczbę Frouda i porównano z wartością minimalną, przy której można stosować przytaczaną metodę.

$$F_N = \frac{V_s}{\sqrt{gL}} = 0,32[-] \quad (27)$$

$$0,32 > 0,2[-] \quad (28)$$

Z powyższej nierówności (28) widać, że warunek został spełniony.

3.1. Obliczenia dla poziomu 1 kryterium podatności statku na czystą utratę stateczności

W kolejnym etapie obliczono minimalną początkowo wysokość metacentryczną GM_{min} i ustalono wartość kryterialną R_{PLA} . Następnie porównano te wartości sprawdzając czy statek nie jest podatny na czystą utratę stateczności na poziomie pierwszym. Zgodnie z wzorem nr 10 obliczono wartość kryterialną R_{PLA} w proponowany sposób i porównano z drugą opcją wynikającą z wzoru wybierając wartość mniejszą. Zgodnie przeprowadzonymi obliczeniami wartość $R_{PLA} = 0,36$ [m]. Do dalszych obliczeń wybrano więc wartość $R_{PLA} = 0,05$ [m]. Następnie obliczono wartość GM_{min} .

$$GM_{min} = 0,037[m] \quad (29)$$

$$GM_{min} = 0,037 < R_{PLA} = 0,05[m] \quad (30)$$

Do obliczeń wykorzystano wzór nr 11 podany w rozdziale 2.1 przy pozytywnym wyniku sprawdzonego warunku opisanego wzorem nr 12.

Przeprowadzone obliczenia wykazują, że oceniany statek na poziomie 1 jest podatny na czystą utratę stateczności. Obliczenia poziomu drugiego przedstawiono w rozdziale 3.2 oraz publikacji [3] (schemat obliczeń przykładowych). Dodatkowego komentarza wymaga wartość GM_{min} obliczona za pomocą programu Hydromax. Wartość początkowej wysokości metacentrycznej obliczonej programem dla modelu fali zgodnie z założeniami metody $\lambda=L$ (długość fali równa długości statku) i $H_s = S_w L$ (wysokość fali znaczącej jest równa iloczynowi długości statku i współczynnika stromości fali) wynosiła $GM_{min} = 0,195$ [m]. Współczynnik stromość fali podany w metodzie wynosi $S_w = 0,0334$ [-]. Natomiast przy użyciu współczynnika stromości dla wbudowanego modelu fali o takiej długości ($S_w = 0,075$ [-]) minimalna wysokość metacentryczna statku na grzbiecie fali wyniosła $GM_{min} = 0,16$ [m]. W obu przypadkach wartości znacząco różnią się od obliczeń wykonanych wzorem nr 29. W sytuacji gdy wartość GM_{min} brana pod uwagę z obliczeń programu w odniesieniu do wartości kryterialnej R_{PLA} statek można uznać jako niepodatny na czystą utratę stateczności.

3.2. Obliczenia dla poziomu 2 kryterium podatności statku na czystą utratę stateczności

Schemat obliczeń zgodnie z przedstawioną metodą dla poziomu 2 dla współczynników CR_1 , CR_2 i CR_3 zaprezentowano w publikacji [3], natomiast wyniki tych obliczeń przedstawiają równania nr 31 i 32.

$$CR_{max} = \max \begin{cases} CR_1 = 0 \\ CR_2 = 0 \\ CR_3 = 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$CR_{max} = 0 < R_{PLO} = 0,06[-] \quad (32)$$

Podsumowując obliczenia podatności statku na czystą utratę stateczności (*vulnerability to pure loss of stability*) należy stwierdzić, że na poziomie drugim statek nie jest podatny na analizowany defekt statecznościowy – wzór nr 31 i 32.

4. CZYSTA UTRATA STATECZNOŚCI - OBLICZENIA

Biorąc pod uwagę obliczenia i wyniki z rozdziału 3 oraz różne wyniki GM_{min} analizie poddano również statek w różnych stanach załadowania i różnych położeniach równowagi – tabela nr 2.

Tab. 2. Wybrane stany załadowania statku

Nr	T [m]	V [m ³]	t [m]	GM [m]	KG [m]
1	1,5	128	-0,50	0,98	2,0
2	1,5	128	-1,00	0,57	2,5
3	1,5	128	-0,50	0,15	2,83
4	1,5	128	-0,60	0,40	2,6
5	1,5	128	-1,90	0,50	2,6

gdzie:

Nr - numer kolejnego stanu załadowania,

T - zanurzenie średnie statku [m],

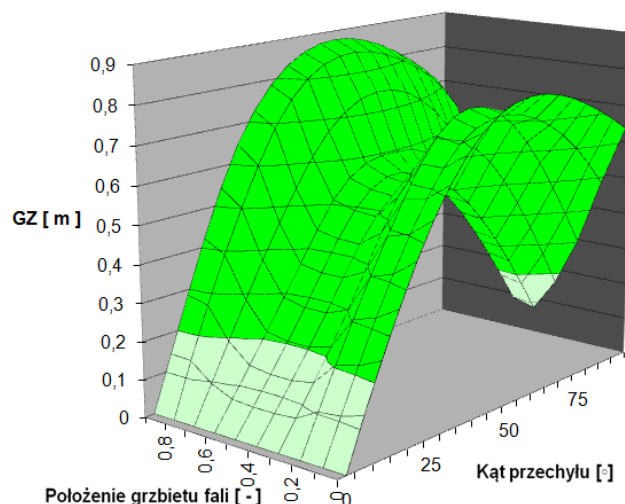
t - przegłębienie statku [m],

GM - początkowa wysokość metacentryczna na wodzie spokojnej [m],

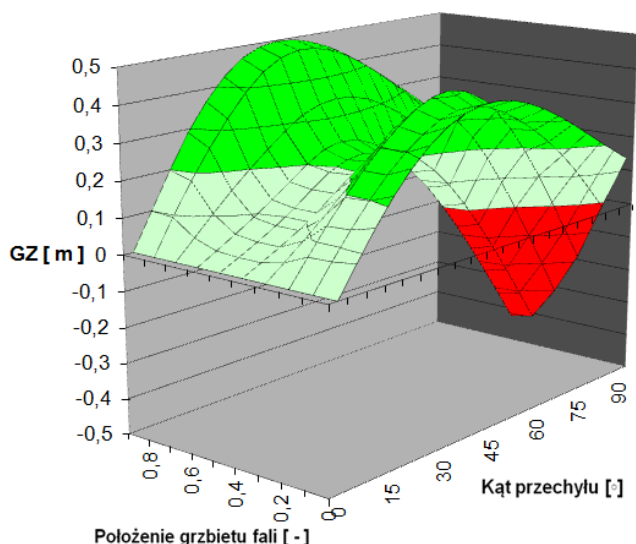
KG - pionowe położenie środka ciężkości [m],

V - objętość podwodnej części kadłuba statku [m³]

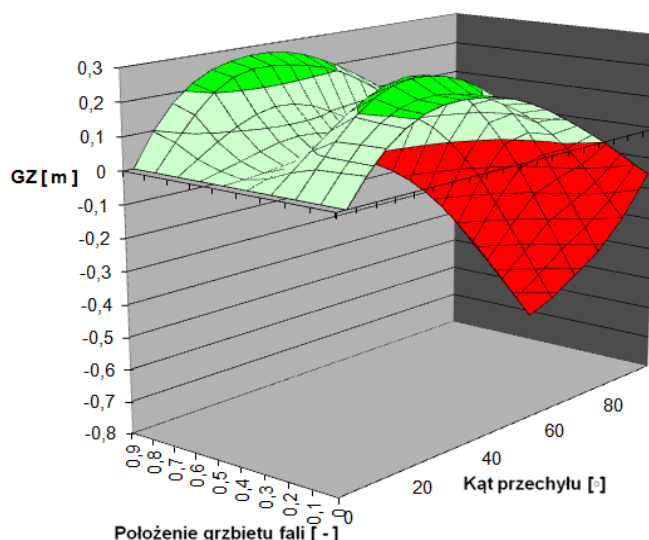
Wyniki obliczeń ramienia prostującego statku na fali dla przypisanych stanów załadowania przedstawiają poniższe rysunki nr 4, 5, 6, 7 i 8. Wszystkie obliczenia wykonane zostały dla fali o długości zbliżonej do długości statku. Parametry uwzględnionej w obliczeniach fali: $H_s = 4$ [m] – wysokość znacząca fali, $\lambda = 25$ [m] – długość fali. Analizie podano różne stany załadowania – inne położenia środka ciężkości oraz przegłębienia i zanurzenia wynikające z tych położzeń. Ramię prostujące obliczone zostało dla różnych położzeń grzbiecia fali względem kadłuba statku, rozpoczynając od pionu rufowego co 0,1 długości statku między pionami kończąc na pionie dziobowym Ramię prostujące policzone zostało w kątach przechyłu od 0 do 90 [°] w odstępach co 5 [°]



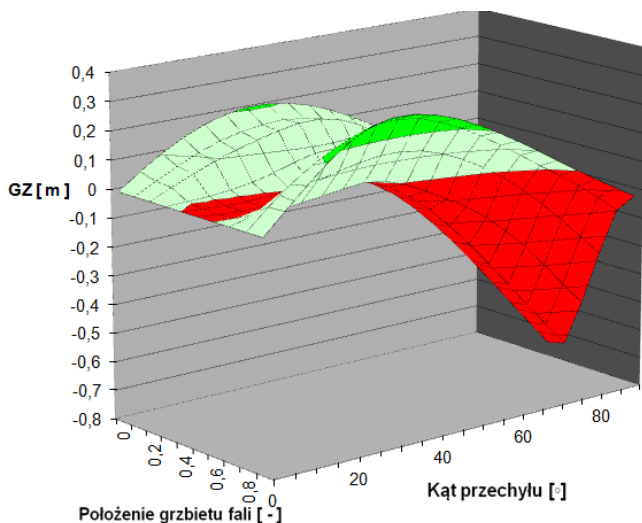
Rys. 4. Wykres ramion prostujących statku na fali dla różnych położzeń grzbiecia fali względem kadłuba statku - stan załadowania nr 1



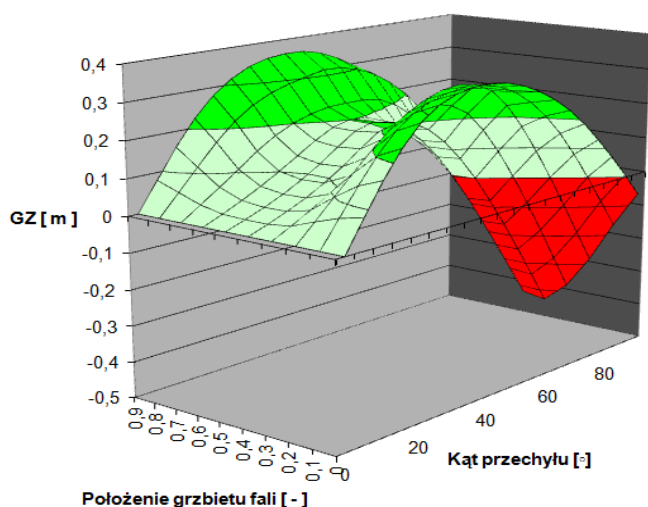
Rys. 5. Wykres ramion prostujących statku na fali dla różnych położeń grzbietu fali względem kadłuba statku - stan załadowania nr 2



Rys. 8. Wykres ramion prostujących statku na fali dla różnych położeń grzbietu fali względem kadłuba statku - stan załadowania nr 5



Rys. 6. Wykres ramion prostujących statku na fali dla różnych położeń grzbietu fali względem kadłuba statku - stan załadowania nr 3



Rys. 7. Wykres ramion prostujących statku na fali dla różnych położeń grzbietu fali względem kadłuba statku - stan załadowania nr 4

PODSUMOWANIE

W publikacji przedstawiono opis teoretyczny zmian momentu prostującego statku na fali oraz czynników wpływających na te zmiany. Przedstawiono koncepcje obliczeń zgodną z dokumentem [6] oceny zjawiska czystej utraty stateczności statku na fali. Dla założeń przedstawionej metody dokonano przykładowych obliczeń dla wybranego modelu statku oraz stanu załadowania. Obliczeń za pomocą oprogramowania dokonano także dla różnych dodatkowych stanów załadowania oraz położeń równowagi. Analizując otrzymane wyniki można sformułować następujące wnioski:

1. Kluczowy w obliczeniach co do wiarygodności otrzymywanych wyników jest model falowania – parametry użytych fal.
2. Metoda dotycząca oceny podatności statku na defekt statecznościowy jakim jest czysta utrata stateczności statku na fali bazuje na modelu fali, który różni się od modelu np. wykorzystywanym przez oprogramowanie Maxsurf/Hydromax co daje inne wyniki obliczeń (poziom 1).
3. W literaturze można spotkać wiele opisów zjawiska czystej utraty stateczności statku na fali z komentarzem, że zawsze największe zmiany w wartości ramienia prostującego powoduje fala o długości porównywalnej z długością statku. Wydaje się bezzasadne dokonywanie obliczeń dla tego modelu dla fali np. długości $\lambda = 630$ m i wysokości $H_s = 11,0$ m. Wyniki obliczeń prawie nie różnią się od obliczeń na wodzie spokojnej.
4. Zjawisko czystej utraty stateczności zostało opisane zgodnie z informacjami w literaturze w rozdziale 1. Wymienione zostały czynniki wpływające na zmianę momentu prostującego/ramienia prostującego statku. Biorąc pod uwagę poziom 2 w proponowanym modelu podatności można stwierdzić że zjawisko – jego wystąpienie lub brak ciężko jednoznacznie stwierdzić badając tylko charakterystyczne miejsca na krzywej ramion prostujących np. zakres ramion prostujących.
5. Dodatkowego komentarza wymagają też załączane rysunki nr 4, 5, 6, 7 i 8. Obliczenia numeryczne dla tego samego modelu i tego samego stanu załadowania pokazują różne zmiany w kształcie ramienia prostującego znacząco różniące się w zależności od położenia równowagi analizowanego statku (różne wartości przegłębienia).
6. Wnioskowanie tylko o wpływie położenia środka ciężkości statku (KG) i parametrach fali jest, biorąc pod uwagę różnice w zmianach ramienia prostującego dla statku z różnymi przegłębieniami.

- bianiami, niewystarczające. W proponowanym schemacie obliczeń dla poziomu 1 i 2 nie uwzględnia się przegłębienia statku.
7. Obliczenia dla różnych stanów załadowania pokazane np. takiej formie jak wyniki w rozdziale 4 mogą być dodatkowymi informacjami w postaci zaleceń eksploatacyjnych w formie i kombinacjach różnych wariantów zanurzeń, przegłębień, wzniesienia środka ciężkości itp. Mogą więc stanowić wyniki dodatkowych obliczeń na etapie poziomu 3.

BIBLIOGRAFIA

1. Belenky V., Bassler C., Spyrou K., *Development of Second Generation Intact Stability Criteria*
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a560861.pdf>
2. Dudziak J., *Teoria okrętu*, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2008
3. Chorab P., *Sample calculations using a draft method for assessment of the vulnerability to pure loss of stability of a fishing vessel*, Zeszyty Naukowe 40(112) Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2014
4. Chorab P., *Stateczność statku w czasie wymiany wód balastowych metodą sekwencyjną*, Technika Transportu Szynowego 10/2013
5. IMO/SDC, <http://www.imo.org/MediaCentre/MeetingSummaries/DE/Pages/Default.aspx>
6. IMO – SDC 1-INF.8 - *Information collected by the Correspondence Group on Intact Stability regarding the second generation intact stability criteria development submitted by Japan*, London 2013
7. Staszewska K., *Druga generacja kryteriów oceny stateczności statków w stanie nieuszkodzonym według IMO*, LOGISTYKA 3/2011
8. Szelangiewicz T., *Propozycja obliczania minimalnej początkowej wysokości meta centrycznej dla statku na fali*, Problemy Eksploatacji, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIP 2004
9. <http://www.bentley.com/enUS/Products/Maxsurf/Marine+Vessel+Analysis+and+Design.htm>

VARIATION THE RIGHTING ARM IN PHENOMENA PURE LOSS OF STABILITY OF A SHIP ON WAVE

Abstract

The paper presents phenomenon of pure loss of stability of the ship on a wave. The results of the calculations were presented from the model of stability defect pure loss of the ship's stability on the wave for assessing the stability by the criteria second generation. Analyzed were variations of righting arms the ship on a wave, for wave crest in different positions relative to the hull of the ship and selected loading conditions of the ship. The results of calculations carried out by software Maxsurf/Hydromax were presented in the attached charts.

Autorzy:

dr inż. **Paweł Chorab** – Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Nawigacji Morskiej, Zakład Budowy i Stateczności Statków, pchorab@am.szczecin.pl