

Przemysław Krata
Akademia Morska w Gdyni
Wydział Nawigacyjny

EWALUACJA PRÓBY KOŁYSAŃ BOCZNYCH JAKO METODY WYZNACZANIA WYSOKOŚCI METACENTRYCZNEJ STATKU

Streszczenie: W artykule zaprezentowano ocenę eksploatacyjnej próby kołysań bocznych, jako eksperymentalnej metody wyznaczania wysokości metacentrycznej statku. Ewaluacja ilościowa została oparta na wynikach rozwiązania równania kołysań bocznych statku w jednym stopniu swobody. Wskazano na istotny wpływ rozkładu mas, a w konsekwencji wartości momentu bezwładności statku, na okres kołysań bocznych. Zaproponowana została potrzeba modyfikacji zaleceń Międzynarodowej Organizacji Morskiej odnośnie zależności stosowanych podczas obliczania wartości wysokości metacentrycznej statku na podstawie próby kołysań bocznych.

Słowa kluczowe: próba kołysań, wysokość metacentryczna, stateczność początkowa statku

1. WPROWADZENIE

Kształtowanie bezpieczeństwa w fazie eksploatacji obiektu nazywane jest zarządzaniem bezpieczeństwem. Jako ważny element procesu zarządzania bezpieczeństwem wymieniana jest efektywna kontrola stanu technicznego obiektu, które to pojęcie obejmuje również ocenę stateczności statku [1]. Ocena stateczności statku morskiego wchodzi zatem w skład działań załogi, realizowanych w celu zapewnienia statkowi wymaganego poziomu bezpieczeństwa podczas żeglugi.

W praktyce żeglugi morskiej ocenę stateczności statku wykonuje się w oparciu o normy określone przez instytucje klasyfikujące statki. Normy te wynikają z zaleceń rezolucji A749(18) IMO (*International Maritime Organization*), która wraz z późniejszymi poprawkami tworzy Kodeks ISC (*Intact Stability Code*) [2]. Normowaniu podlegają parametry określające kształt krzywej ramion prostujących, w tym wysokość metacentryczna powiązana z krzywą ramion prostujących poprzez trójkąt metacentryczny.

Zasadniczą metodą stosowaną do wyznaczania wartości wysokości metacentrycznej jest metoda obliczeniowa. Polega ona na sporządzeniu tabeli obliczeń masowych w celu określenia położenia środka masy statku, a następnie skorzystaniu z danych hydrostatycznych statku w zakresie odczytu rzędnej początkowego metacentrum poprzecznego.

Ze względu na niepewność danych odnośnie masy ładunku, a niejednokrotnie nawet nierzetelność w podawaniu tych danych przez załadowcę, rzeczywiste położenie środka masy statku może istotnie różnić się od wyliczonego w tabeli obliczeń masowych [6]. Jest to jeden z istotniejszych powodów, dla których wysokość metacentryczna wyznaczana jest nie tylko w oparciu o kalkulacje, ale również eksperymentalnie.

2. PRÓBA KOŁYSAŃ BOCZNYCH

Jedną z metod eksperymentalnych służącą do wyznaczania wysokości metacentrycznej statku morskiego jest próba kołysań bocznych. Polega ona na rozkołysaniu statku na wodzie spokojnej i następnie zmierzeniu okresu kołysań bocznych swobodnych po ustaniu wymuszenia zewnętrznego. Przyjmuje się z dobrym przybliżeniem równość okresu kołysań bocznych nie tłumionych, dla których wyprowadzona zależność okresu od wysokości metacentrycznej ma prostą postać i rzeczywistych kołysań bocznych tłumionych [7]. Okres kołysań bocznych statku związany jest z wysokością metacentryczną zależnością:

$$T_{\varphi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{g \cdot GM}} \approx \frac{2 \cdot f}{\sqrt{GM}} \quad (1)$$

gdzie:

T_{φ} – okres kołysań statku;

f – poprzeczny promień bezwładności statku;

g – przyspieszenie ziemskie;

GM – wysokość metacentryczna (poprzeczna).

W przypadku wykonywania próby kołysań bocznych na średnim bądź dużym statku, wymuszenie jego kołysań na wodzie spokojnej jest bardzo trudne. Z tego względu próbę przeprowadza się na akwenu o relatywnie niewielkim sfalowaniu powierzchni morza, wykorzystując owo falowanie do wymuszenia kołysań statku. Pomierzony okres kołysań bocznych nie jest wówczas okresem kołysań swobodnych, co jest przyczyną spadku dokładności opisywanej metody wyznaczania wysokości metacentrycznej. Nie oznacza to jednakże nieprzydatności metody, a raczej konieczność umiejętnej krytycznej interpretacji wyników eksperymentu. W przypadku uzasadnionych wątpliwości odnośnie przybliżenia okresu kołysań swobodnych okresem kołysań wymuszonych w danych warunkach hydrometeorologicznych, wynik próby należy interpretować jakościowo, nie zaś ilościowo.

Wartość współczynnika c uwzględniającego promień bezwładności statku względem osi wzdlużnej przechodzącej przez środek jego masy, który jest wykorzystywany w zależności (1), odczytywana jest z dokumentacji statku bądź w przypadku jej braku szacowana na podstawie zaleceń. Przykładowo dla drewnowców współczynnik c zgodnie z zaleceniami *Transport Canada* przyjmuje w metrycznym systemie miar wartości [3]:

- $f = 0,440 \cdot B$ – dla statku pustego bądź pod balastem;
 - $f \in \langle 0,390 \cdot B; 0,365 \cdot B \rangle$ – dla statku załadowanego, w zależności od ilości cieczy przewożonych w zbiornikach;
- gdzie B oznacza szerokość statku.

W praktyce częstokroć nie jest dostępna na statku informacja odnośnie jego promienia bezwładności w aktualnym stanie załadowania. Najczęściej stosowana jest wówczas formuła zalecana przez IMO [2]:

$$T_{\varphi} = \frac{2 \cdot c \cdot B}{\sqrt{GM}} \quad (2)$$

$$c = 0,373 + 0,023 \cdot \frac{B}{d} - 0,043 \cdot \frac{L}{100} \quad (3)$$

gdzie:

c – współczynnik uwzględniający poprzeczny promień bezwładności statku;

B – szerokość statku;

d – zanurzenie średnie statku;

L – długość między pionami;

pozostałe oznaczenia jak w zależności (1).

Należy zauważyć, że zależność (2) i związana z nią zależność (3) nie uwzględnia wpływu tłumienia na okres kołysań bocznych statku – co jest całkowicie uzasadnione [7] – ale również wpływu rozkładu masy na statku na mierzony okres kołysań. Zależność (3) zalecana przez IMO [2] została opracowana na podstawie analizy regresyjnej dla ograniczonej grupy statków i stanowi rodzaj uśrednienia wartości osiowego poprzecznego momentu bezwładności statku.

3. RÓWNANIE KOŁYSAŃ BOCZNYCH STATKU

Dogodnym sposobem rozpatrywania ruchu statku jest wyodrębnienie jego ruchu średniego oraz oscylacji (kołysań) wokół chwilowego położenia wynikającego z ruchu średniego [5]. Złożenie ruchu średniego oraz kołysań odzwierciedla całkowity ruch statku. Przyjęto, iż całkowity ruch statku może zostać opisany jako jednostajny prostoliniowy ruch średni oraz ruch oscylacyjny odbywający się wokół położenia średniego. Ruch oscylacyjny kadłuba statku, nazywany kołysaniem, może występować w ogólności we wszystkich sześciu stopniach swobody. W ogólności wszystkie kołysania są sprzężone ze sobą, jednakże w literaturze przedmiotu można odnaleźć różnorodne podejście do zagadnienia uwzględniające różną liczbę sprzężeń jako istotne.

Z kołysaniem bocznym najsilniej sprzężone są kołysanie burtowe i myszkowanie, ale zwykle nie są decydujące dla stateczności poprzecznej i w kolejnym stopniu uproszczenia zagadnienia kołysania statku, niejednokrotnie są pomijane [4]. Szczególnie dotyczy to zagadnień związanych z analizą kołysania bocznego w warunkach, w których nie występuje rezonans parametryczny kołysań. Dopuszcza się zatem rozpatrywanie kołysania

statku w oparciu o jedno równanie różniczkowe kołysań bocznych, pomijające sprzężenia z pozostałymi ruchami, mimo, iż sprzężenia te występują [4]. Równanie kołysań bocznych statku (kierunek kołysań oznaczany zwyczajowo jako „4”) przyjmuje wówczas postać [4]:

$$I_4 \ddot{\varphi} + D_4(\dot{\varphi}) + R_4(\varphi) = M_4(t) \quad (4)$$

gdzie:

I_4 - poprzeczny osiowy moment bezwładności statku i mas towarzyszących;

D_4 - moment tłumiący kołysania;

R_4 - poprzeczny moment prostujący;

M_4 - wypadkowy poprzeczny moment przechylający;

φ - chwilowy kąt przechyłu statku;

$\dot{\varphi}$ - pierwsza pochodna czasowa kąta przechyłu (prędkość kątowa kołysania bocznego);

$\ddot{\varphi}$ - druga pochodna czasowa kąta przechyłu (przyspieszenie kątowe kołysania bocznego).

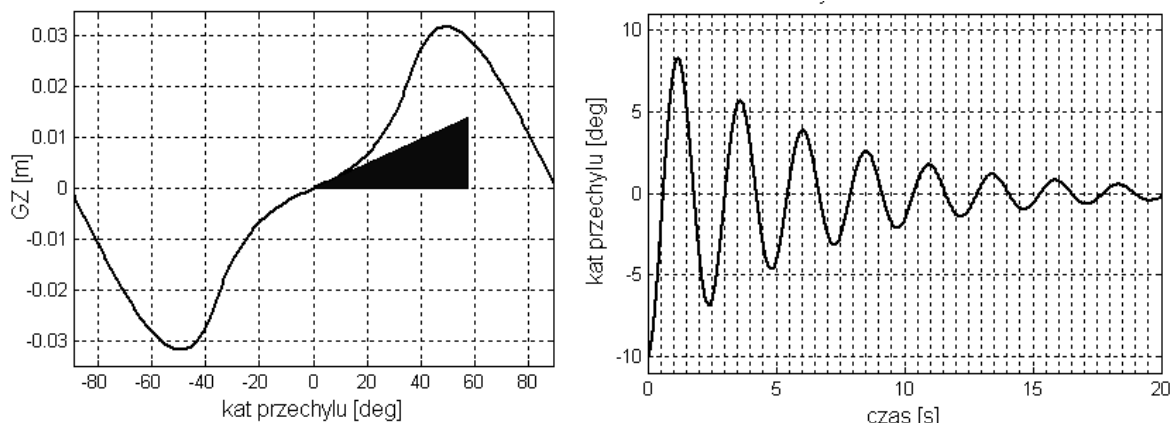
Równanie kołysań bocznych statku w postaci (4) przyjęto jako podstawę ewaluacji eksploatacyjnej próby kołysań bocznych statku.

4. ROZWIĄZANIE RÓWNIANIA KOŁYSAŃ BOCZNYCH

Rozwiązaniem równania kołysań bocznych statku w postaci (4) jest historia zmian wartości kąta przechyłu statku w czasie. Równanie (4) rozwiązano numerycznie dla przykładowego nieskomplikowanego kształtu. Przyjęto do obliczeń barcę prostopadłościenną o wymiarach:

- długość $L=1\text{m}$;
- szerokość $B=0,4\text{m}$;
- wysokość boczna $H=0,3\text{m}$;
- zanurzenie $T=0,15\text{m}$.

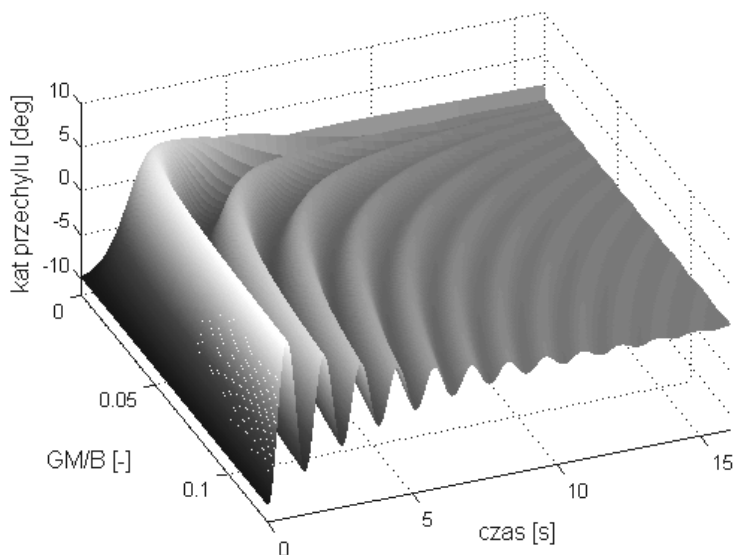
Wyznaczona krzywa ramion prostujących dla rzędnej środka masy $z_G = \frac{H}{2}$ rozważanej barki została przedstawiona na Rys. 1 z lewej strony. Odzwierciedla ona człon $R_4(\varphi)$ w równaniu (4). Dla znanego przebiegu krzywej ramion wyznaczono następnie historię kołysań w przypadku wymuszenia przechyłu barki równego 10° i uwolnieniu barki z więzów na wodzie spokojnej. W obliczeniach przyjęto brak momentu przechylającego od wiatru, czyli wyzerowano człon $M_4(t)$ równania (4). Tłumienie przyjęto liniowo zależne od prędkości kątowej ruchu barki – człon $D_4(\dot{\varphi})$ równania (4) [4]. Masę barki i wody towarzyszącej w członie $I_4 \ddot{\varphi}$ rozwiązywanego równania przyjęto jako stałą. Historię przykładowego kołysania bocznego prezentuje Rys. 1 z prawej strony.



Rys. 1. Krzywa ramion prostujących dla rozważanej barki (z lewej) i przykładowe rozwiązanie równania kołysań bocznych barki (z prawej)

W celu dokonania oceny wpływu zmiennych na okres kołysań bocznych mierzony podczas próby, wykonano obliczenia historii zmian kąta przechyłu dla różnych wartości wysokości metacentrycznej barki, jak również różnych wartości jej momentu bezwładności względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek masy barki.

W pierwszym cyklu obliczeń przyjęto wartość momentu bezwładności jako stałą i równą momentowi bezwładności barki o jednorodnym rozkładzie masy w całej jej objętości. Zmieniającym się parametrem była zaś wysokość metacentryczna. Wyniki obliczeń prezentuje graficznie Rys. 2. Dla wygody zastosowano bezwymiarową wysokość metacentryczną, powstałą poprzez podzielenie wysokości metacentrycznej GM przez szerokość statku B .



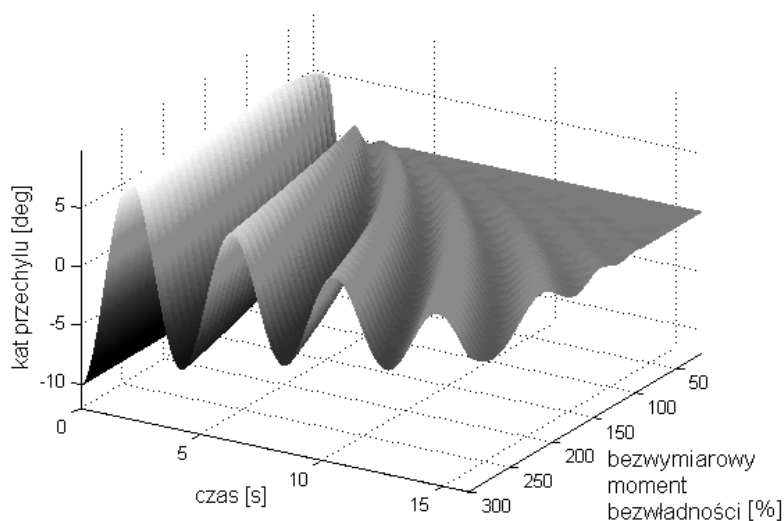
Rys. 2. Historia zmian kąta przechyłu podczas próby kołysań bocznych barki dla ustalonej wartości poprzecznego momentu bezwładności i zmiennej wartości wysokości metacentrycznej

Zgodnie z założeniami próby kołysań bocznych statku, okres kołysań jest silnie zależny od wysokości metacentrycznej. Związek pomiędzy nimi opisuje przytoczona zależność (1) i pochodząca od niej zależność (2). Fakt ten jest podstawą próby kołysań. Jednakże w

zależności (2) i dalej zależności (3) służącej do wyznaczania współczynnika uwzględniającego poprzeczny promień bezwładności statku, przyjmuje się stałą wartość owego promienia. Zgodnie z zależnością (3) promień bezwładności jest stały dla danego zanurzenia statku, gdyż uzależniony jest wyłącznie od wymiarów statku (długości i szerokości) oraz od zanurzenia. Zanurzenie statku jest – zgodnie z prawem Archimedesesa – związane wyłącznie z wypornością statku, nie zaś z rozkładem mas w jego wnętrzu.

W praktyce żeglugi morskiej przestrzeny rozkład mas na statku może być bardzo różny. Uzależniony jest on od ilości ładunku, jego rodzaju, konstrukcji statku, planowanej rotacji portów i wielu innych czynników. Zatem założenie jednakowej wartości poprzecznego momentu bezwładności dla każdego statku o zadanej długości, szerokości i zanurzeniu jest błędne. Różnice w wartościach momentu bezwładności dla rudowca z ładunkiem i wysoko załadowanego kontenerowca są znaczące.

W celu zbadania wpływu różnorodnego rozkładu masy na statku wykonano kolejną serię obliczeń, w których zmienianym parametrem był poprzeczny moment bezwładności statku, przy ustalonej wartości wysokości metacentrycznej (odpowiadającej rzędnej środka masy statku $z_G = \frac{H}{2}$). Moment bezwładności zmieniano podczas obliczeń w zakresie od 50% do 300% momentu bezwładności barki o jednorodnym rozkładzie masy w całej swej objętości. Podczas sporządzania wykresu obrazującego wyniki obliczeń posłużono się takim bezwymiarowym momentem bezwładności wyrażonym w procentach momentu barki jednorodnej. Wyniki obliczeń przedstawione zostały na Rys. 3.



Rys. 3. Historia zmian kąta przechyłu podczas próby kołysań bocznych barki dla ustalonej wartości wysokości metacentrycznej i zmiennej wartości poprzecznego momentu bezwładności barki

Wyniki obliczeń przedstawione na Rys. 3. jednoznacznie wskazują silną zależność okresu kołysań bocznych – mierzonego podczas opisywanej próby – od wartości poprzecznego momentu bezwładności statku. Rezultat taki stoi w sprzeczności z zalecaną procedurą wyznaczania wysokości metacentrycznej, w której możliwość zmiany wartości poprzecznego momentu bezwładności statku nie jest uwzględniana.

5. WNIOSKI

Próba kołysań bocznych, będąca jedną z eksperymentalnych metod wyznaczania wysokości metacentrycznej statku, ma niepodważalny walor w postaci całkowitej niezależności od danych odnośnie masy ładunku podawanych przez załadowcę. Zastosowana jako metoda jakościowa w ogóle może obywać się bez wykonywania jakichkolwiek obliczeń, zaś wskaźnikiem niepokojąco małej stateczności początkowej statku jest wówczas długi okres kołysań bocznych. Określenia „mała stateczność” i „długi okres kołysań” są nieostre i wymagają pewnego doświadczenia od osób przeprowadzających próbę kołysań bocznych.

W przypadku wykorzystania próby kołysań jako metody ilościowej, konieczne jest wykonanie prostych obliczeń zgodnie z zależnościami (2) i (3). Słabością zalecanych zależności, wykazaną w opisywanych badaniach, jest jednak nie uwzględnianie faktycznej wartości poprzecznego momentu bezwładności statku w danym stanie załadowania, mimo, iż moment ten może się zmieniać w stosunkowo szerokich granicach.

Opisywane badania wskazują, że podczas próby kołysań bocznych, gdzie mierzoną wielkością jest okres kołysań, w istocie wyznaczana zostaje para: wysokość metacentryczna - poprzeczny moment bezwładności statku. Na podstawie stosowanych i zalecanych przez IMO zależności, oficer na statku nie ma możliwości ocenić wpływu poszczególnych zmiennych na okres kołysań bocznych. Podczas próby poznaje wyłącznie wpływ łączny obu wielkości, ale wnioskuje wyłącznie odnośnie jednej z nich – wysokości metacentrycznej.

Najistotniejszym wnioskiem płynącym z przeprowadzonych obliczeń i analiz jest sugestia niewielkiej modyfikacji zalecanych przez Międzynarodową Organizację Morską zależności (2) i (3). Modyfikacja owa winna polegać na zmianie sposobu wyznaczania wartości współczynnika c uwzględniającego poprzeczny moment bezwładności statku. Istnieje szereg wzorów pozwalających na estymację wartości przedmiotowego momentu bezwładności [7]. Pozostaje kwestią otwartą który z owych wzorów zastosować, bądź jak go zmodyfikować, aby dla poszczególnych typów statków i rodzajów ładunku uzyskać jak najlepsze oszacowanie poprzecznego momentu bezwładności i co za tym idzie jak największą dokładność wyznaczania wysokości metacentrycznej statku.

Bibliografia

1. Hann M., Siemionow J. N., Rosochacki W.: Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów górnictwa morskiego, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.
2. Intact Stability Code, IMO, London 2002.
3. Memorandum to Administrations on an Approximate Determination of Ship's Stability by Means of the Rolling Period Tests (for ships up to 70 m in length), Transport Canada, <http://www.tc.gc.ca/eng/marinesafety/tp-tp2534-appendix-iii-1543.htm> (marzec 2010).
4. Senjanovic I., Parunov J., Cipric G.: Safety Analysis of Ship Rolling in Rough Sea, Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 8, No 4, Elsevier Science Ltd, Great Britain 1997.
5. Szelangiewicz T.: Podstawy teorii projektowania kotwicznych systemów utrzymania pozycji jednostek pływających, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2003.

6. Szozda Z.: The concept of application of fuzzy sets theory in order to calculate stability characteristics of ro-ro passenger ferries, Proceedings of 2-nd International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, Cadiz 2000.
7. Welnicki W.: Mechanika ruchu okrętu, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1989.

EVALUATION OF FREE ROLLING TEST AS A METHOD OF SHIP'S METACENTRIC HEIGHT ESTIMATION

Abstract: The evaluation of on-board free rolling test as a method of ship's metacentric height estimation is presented in the paper. It is based on results of rolling equation computation solved in one degree-of-freedom. The influence of mass distribution and as its consequence the moment of inertia of a ship and added masses on her rolling period is revealed. The need for a revision in the International Maritime Organization recommendations regarding free rolling test is suggested.

Keywords: free rolling test, metacentric height, ship's initial stability