

WYKORZYSTANIE POMIARÓW DO MODELOWANIA PRZECHYŁU SPOWODOWANEGO ZWROTEM W KONTEKŚCIE KRYTERIUM BEZPIECZEŃSTWA STATKÓW PASAŻERSKICH

Streszczenie

Kryterium bezpieczeństwa statecznościowego statku morskiego dotyczące przechyłu spowodowanego zwrotem jest przestarzałe i wymaga nowelizacji. Nowelizacja kryterium powinna mieć podstawy naukowe. Źródłem danych do analiz powinny być pomiary przechyłów na modelach lub w skali rzeczywistej. W artykule przedstawiono pakiet danych, niezbędnych i jednocześnie wystarczających do analizy, w szczególności do wyodrębnienia spośród różnych momentów przechylających, działających na statek w cyrkulacji, momentu powstającego na kadłubie statku – wielkości, której nie można bezpośrednio zmierzyć. Zawartość pakietu opracowano na podstawie wniosków z prób wykonanych na modelach. Analiza odpowiednio dużego zbioru danych z pomiarów powinna umożliwić uogólnienie prowadzące do nowelizacji kryterium.

WSTĘP

Wychylenie steru lub uruchomienie innego urządzenia sterowego na statku płynącym ruchem prostoliniowym powoduje zmianę sposobu opływu podwodnej części kadłuba przez wodę, a także zaburzenie pola prędkości wody, w której statek się porusza. Opływ kadłuba i zaburzenia, o których mowa, są zjawiskami hydrodynamicznymi o bardzo skomplikowanym charakterze. Skutkiem zaistnienia tych zjawisk jest między innymi zmiana parametrów ruchu statku, takich jak np.: spadek prędkości, zmiana kierunku ruchu, dryf, a także przechył statku.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa statecznościowego przechył statku jest zjawiskiem niepożądanym, a czasami wręcz niebezpiecznym, mogącym spowodować wywrócenie się statku. Jako przykład można przytoczyć przewrócenie się promu pasażersko-samochodowego Sewol u wybrzeży Korei Południowej w roku 2014, w wyniku którego życie straciły 304 osoby.

Zgodnie z nomenklaturą opracowaną przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) [1] nadmierny przechył spowodowany zwrotem można zaliczyć do tzw. defektów statecznościowych. Dlatego kąt przechyłu spowodowanego tym manewrem jest jednym z kryteriów oceny stateczności statków. W świetle obowiązujących aktualnie przepisów stosowanie tego kryterium jest obowiązkowe tylko dla statków pasażerskich [2]. Niemniej jednak, niektóre administracje morskie stosują to kryterium także dla innych statków, które mogą osiągać relatywnie duże prędkości, a których zanurzenie jest małe przy stosunkowo wysokim położeniu środka ciężkości, jak np.: kontenerowce, samochodowce, czy jednokadłubowe statki szybkie.

1. KĄT PRZECHYŁU SPOWODOWANEGO ZWROTEM JAKO KRYTERIUM OCENY STATECZNOŚCI STATKU PASAŻERSKIEGO

Obowiązek stosowania kryterium kąta przechyłu spowodowanego zwrotem dla statków pasażerskich polega na tym, że zarówno projektanci przed zbudowaniem danego statku, jak i kierownictwo statku przed każdorazowym wyjściem w morze, muszą sprawdzić, czy obliczony (zgodnie z wymaganiami określonymi w odpowiednich przepisach) kąt przechyłu nie przekracza wartości dopuszczalnej,

która wynosi 10 stopni. Przepis ten wyraża się następującą nierównością:

$$\varphi_R \leq 10 [^\circ] \quad (1)$$

gdzie:

φ_R – kąt przechyłu spowodowanego zwrotem (kryterium),

10 – wartość dopuszczalna określona przepisami, wyrażona w stopniach (tzw. standard).

Model matematyczny opisujący zależność przechyłu statku od czasu w przypadku zwrotu, powszechnie stosowany w teorii okrętu [3], bazuje na prawie Newtona, które w tym przypadku można sformułować następująco: przyspieszenie kątowe przechyłu w danej chwili jest wprost proporcjonalne do sumy momentów przychylających, działających w płaszczyźnie poprzecznej, i odwrotnie proporcjonalne do sumy momentu bezwładności statku i momentu bezwładności tzw. masy wody towarzyszącej. Ma on następującą postać (układ odniesienia lewoskrętny, kąt wychylenia steru na prawą burtę ujemny):

$$(I_x + m_\varphi) \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 M_{x_i} = N \cdot \frac{d\varphi}{dt} - m \cdot g \cdot GZ(\varphi) - M_R + M_H \quad (2)$$

gdzie:

$I_x + m_\varphi$ – poprzeczny moment bezwładności statku I_x powiększony o poprzeczny moment bezwładności masy wody towarzyszącej m_φ ;

t – czas;

$\varphi = \varphi(t)$ – kąt przechyłu statku, będący funkcją czasu;

M_x – moment przechylający działający w płaszczyźnie poprzecznej statku;

N – współczynnik tłumienia kołysań bocznych ($N < 0$);

m – masa statku;

g – przyspieszenie ziemskie;

$GZ(\varphi)$ – ramię prostujące zależne od przechyłu statku; w postaci zlinearyzowanej $GZ(\varphi) = GM \cdot \varphi$, gdzie GM – początkowa wysokość metacentryczna;

M_R – moment przechylający powodowany siłą oddziaływania steru ($M_R < 0$ dla prawej cyrkulacji);

M_H – moment przechylający generowany na kadłubie statku ($M_H < 0$ dla prawej cyrkulacji).

W zasadzie tylko trzy współczynniki ujęte we wzorze (2) można przyjąć jako niezależne od czasu w czasie cyrkulacji: poprzeczny moment bezwładności statku, masa statku i przyspieszenie ziemskie. Pozostałe w mniejszym lub większym stopniu są zależne od czasu, a ściśle metody ich określania bazujące na wymiarach głównych statku nie zostały dotychczas opracowane. Istnieją przybliżone metody ich określania (np. współczynnika tłumienia kołysań bocznych czy siły oddziaływania steru) lecz wciąż nie pozwalają one na zadawalająco dokładne odwzorowanie skomplikowanych zjawisk hydrodynamicznych.

Równanie (2) znalazło zastosowanie w formułowaniu przepisów bezpieczeństwa. Przyjęto, iż zostanie ono rozwiązane dla ustalonej fazy cyrkulacji. W tej fazie statek porusza się ze stałą prędkością po trajektorii zbliżonej do okręgu o promieniu R . Przechył statku stabilizuje się (wynosi φ_R – zob. rysunek 2) i zarówno prędkość kątowna, jak i przyspieszenie kątowne przechylenia są równe zero. Dodatkowo zakłada się, że siła oddziaływania steru, a co za tym idzie moment przechylający generowany na sterze, wskutek istnienia tzw. kąta dryfu, jest pomijalnie mały.

$$\frac{d\varphi}{dt} = 0; \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0; \quad M_R = 0.$$

Formułując przepisy założono także, że siła dośrodkowa powodująca ruch statku po okręgu jest przyłożona do kadłuba statku w połowie zanurzenia oraz że odpowiadająca jej siła odśrodkowa jest przyłożona do środka ciężkości, a także, że promień cyrkulacji R jest równy pięć długości statku na wodnicy L_{WL} . Założenia upraszczające opisane powyżej przekształcają model wyrażony wzorem (2) we wzór (4), za pomocą którego można określić moment przechylający statek w ustalonej fazie cyrkulacji. Wzór (4) jest używany w międzynarodowych przepisach bezpieczeństwa statecznościowego [2].

$$m \cdot g \cdot GZ(\varphi_R) = M_H = \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \left(KG - \frac{d}{2} \right) = 0,2 \cdot \frac{m \cdot v^2}{L_{WL}} \cdot \left(KG - \frac{d}{2} \right) \quad (3)$$

$$M_H = 0,2 \cdot \frac{m \cdot v^2}{L_{WL}} \cdot \left(KG - \frac{d}{2} \right) \quad (4)$$

gdzie:

v – prędkość postępową statku;

R – promień cyrkulacji;

L_{WL} – długość statku na wodnicy;

KG – wzniesienie środka ciężkości statku nad płaszczyznę podstawową;

d – zanurzenie średnie statku;

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2).

Wyznaczenie momentu przechylającego pozwala na obliczenie przechyłu statku w ustalonej fazie cyrkulacji (φ_R) i stwierdzenie, czy przepis wyrażony wzorem (1) jest spełniony. Przepisy bezpieczeństwa nie precyzują metody określania kąta φ_R , który jest kryterium, co można uznać za drobne niedociągnięcie przepisów, pozostawiające swobodę co do wyboru metody obliczeń.

W latach 60-tych poprzedniego wieku, kiedy formułowano przepis bezpieczeństwa dotyczący przechyłu spowodowanego zwrotem, nie było innych możliwości, jak zastosowanie daleko idących uproszczeń w modelu matematycznym, opisanych wyżej, w myśl zasady, iż lepiej jest sformułować uproszczone kryterium bezpieczeństwa i wdrożyć je do projektowania i eksploatacji statków, niż nie mieć żadnego.

W roku 2011 delegacja Wielkiej Brytanii podniosła na forum IMO problem, iż istniejące kryterium, o którym mowa, nie jest adekwatne do aktualnego poziomu techniki i technologii i należy je zmodyfikować między innymi w ten sposób, aby odnieść się do maksymalnego kąta przechyłu, jaki jest obserwowany na statku

robiącym zwrot (φ_{Max} – zob. rysunek 2), a nie do kąta przechyłu w ustalonej fazie cyrkulacji [4]. Nieliczne badania w tym zakresie wskazują, że φ_{Max} może być dwukrotnie większy, niż φ_R [5]. Dyskusja na forum IMO trwała ponad dwa lata. Zakończyła się stwierdzeniem, że brak jest odpowiednich wyników badań cyrkulacji, na podstawie których IMO mogłoby zmodyfikować kryterium kierując się podstawami naukowymi. Wzięto także pod uwagę, że podkomitet techniczny, który zajął się tym problemem jest przeciążony pracą nad bardziej pilnymi zagadnieniami. Ostatecznie IMO przerwało prace w tym temacie pozostawiając kryterium w aktualnej (a w zasadzie „przestarzałej”) postaci [6]. Niemniej jednak potrzeba doskonalenia tego kryterium jest oczywista i zasadne jest aby prowadzić prace zmierzające do gromadzenia wiedzy w tym zakresie, a w szczególności danych pochodzących z pomiarów, które mogłyby służyć do doskonalenia modelu matematycznego w celu eliminowania uproszczeń, które opisano wyżej.

2. PAKIET INFORMACJI GROMADZONYCH W WYNIKU POMIARÓW

W czasie, gdy na forum IMO trwała dyskusja na temat omawianego kryterium, w Badawczo-Szkoleniowym Ośrodku Manewrowania Statkami, działającym pod egidą Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska na jeziorze Silm w ławie wykonano kilkanaście prób polegających na pomiarze przechyłów dwóch modeli statków – pasażerskiego i kontenerowca. Modele zostały wykonane w skali 1:24. Jednym z celów prób było przetestowanie, jaki jest minimalny zbiór mierzonych parametrów w jednej próbie, który byłby wystarczający do późniejszego sformułowania nowego przepisu bezpieczeństwa w aspekcie maksymalnego przechyłu statku wykonującego zwrot. W ramach jednej próby mierzono następujące parametry ruchu modelu w funkcji czasu:

- kąt wychylenia steru: $\alpha = \alpha(t)$;
- kąt przechyłu modelu: $\varphi = \varphi(t)$;
- pozycja anteny zainstalowanej na statku: $x = x(t)$, $y = y(t)$.

Typowa próba składała się z następujących etapów:

1. Rozpędzenie modelu do określonej prędkości w ruchu prostoliniowym.
2. Wychylenie steru na daną burtę o określony kąt i wykonanie pełnej cyrkulacji.
3. Przesunięcie znanego ciężaru na znaną odległość w trakcie cyrkulacji ustalonej.
4. Rozkołysanie modelu w cyrkulacji ustalonej i pozostawienie go w gasnących kołysaniach.

Pomiar pozycji anteny pozwolił na określenie prędkości postępowej modelu i trajektorii ruchu punktu statku, w którym zamontowana była antena. Przesunięcie znanego ciężaru na znaną odległość w trakcie cyrkulacji ustalonej pozwoliło na określenie wzrostu przechyłu pod wpływem znanego momentu przechylającego i docelowo obliczenie momentu przywracającego reprezentowanego funkcją $GZ(\varphi)$. Rozkołysanie modelu w cyrkulacji ustalonej pozwoliło na określenie okresu kołysań własnych tłumionych i wzajemnych relacji pomiędzy kolejnymi amplitudami kołysań, co w dalszej kolejności pozwoliło na obliczenie współczynnika tłumienia N oraz sumy poprzecznych momentów bezwładności modelu i masy wody towarzyszącej.

Typowy wynik pomiaru kąta przechyłu w funkcji czasu dla jednej próby przedstawiono na rysunku 1, na którym także zaznaczono poszczególne etapy próby opisane wyżej.

Wykonanie kilkunastu prób nie prowadzi do zebrania odpowiedniej bazy danych, zwłaszcza, iż niektóre z prób nie były udane – nie

udało się „wyraziście” zmierzyć badanych wielkości. Natomiast praktyczne obserwacje poczynione w trakcie ich wykonywania można sformułować następująco:

- próby muszą być wykonywane w idealnych warunkach pogodowych (bezwietrzna pogoda i brak jakiegokolwiek falowania) – nawet najmniejsza fala i wiatr zakłócają wyniki pomiarów i uniemożliwiają ich analizę;
- pomimo użycia dużych modeli (długość ponad 10 m, co odpowiada małym statkom rybackim) nie uniknięto problemów związanych z efektem skali w następujących aspektach:
 - sztywność modeli (mierzona wartością początkowej wysokości metacentrycznej, która np. w przypadku modelu statku pasażerskiego wynosiła 0,296 m), niezbędna dla bezpieczeństwa osób na nich przebywających, powoduje, że mierzone kąty przechyłu są małe, co wpływa negatywnie na swobodną możliwość obserwacji zmian przechyłów na poszczególnych etapach prób (zmiany nie są wyraziste);
 - masa jednego człowieka jest na tyle duża, że nieznaczne ruchy ludzi, nawet niezamierzone, wpływają na wyniki pomiarów zakłócając je.

Powyższe obserwacje prowadzą do konkluzji, iż w przypadku wykorzystywania modelu do pomiarów przechyłu wywołanego zwrotem, model ten powinien być duży, podatny na przechyły (szacuje się, że początkowa wysokość metacentryczna modelu wykonanego w skali 1:24 powinna być rzędu 0,04 m) i najlepiej sterowany zdalnie lub obsługiwany tylko przez jedną osobę (jednakże $GM=0,04$ m jest zbyt małe, aby osoba mogła bezpiecznie przebywać na modelu – model wywróci się). Wymóg zdalnego sterowania powoduje poważne utrudnienia (dodatkowe przyrządy, koszty itp.), jednakże wyniki pomiarów będą bardziej wiarygodne i użyteczne. Idealnym rozwiązaniem, usuwającym problem skali, jest wykonywanie pomiarów w skali 1:1, czyli na statkach (najlepiej pasażerskich) w eksploatacji, co niestety wiąże się z tak dużymi kosztami, że wniosek ten jest mało realny w praktyce.

Wstępne próby analizy zebranych danych pozwoliły na sformułowanie wniosku co do niezbędnego, a zarazem i wystarczającego pakietu informacji, jaki należałoby umieszczać w bazie danych odnośnie prób cyrkulacji. Pakiet ten może pozwolić w przyszłości na doskonalenie modelu matematycznego prowadzącego do modyfikacji kryterium przechyłu statku spowodowanego zwrotem.

Poszczególne parametry, stanowiące pakiet gromadzonych informacji, zostały zebrane w tabeli 1. Przyporządkowano im następujące kategorie:

- A – dany parametr może być zmierzony bezpośrednio z dokładnością zależną od klasy aparatury pomiarowej;
- B – dany parametr może być obliczony dokładnie na podstawie innych zmierzonych parametrów;
- C – dany parametr może być oszacowany (obliczony z wykorzystaniem metod przybliżonych) na podstawie innych zmierzonych parametrów;

- D – nie można zmierzyć danego parametru, a ewentualne metody jego obliczania charakteryzują się zbyt małą dokładnością w stosunku do potrzeb (np. metoda symulacyjna określania momentu przechylającego generowanego na kadłubie statku M_H).

Znaki „+” i „-” w tabeli 1 określają dostępność metod i/lub aparatury do pomiaru danego parametru.

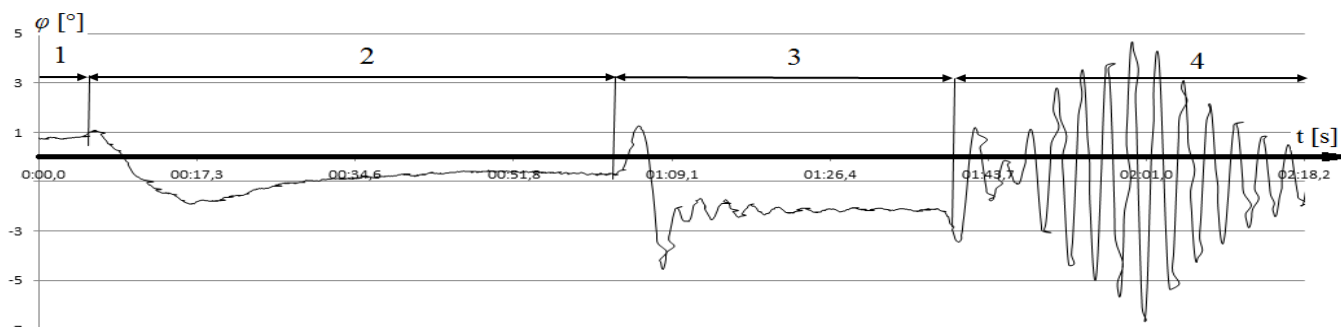
Tab. 1. Parametry mierzone w trakcie próby, stanowiące pakiet informacji

Parametr	Kategoria	Model	Statek	Komentarz
m	B	+	+	Na podstawie pomiaru zanurzenia modelu i gęstości wody.
$\varphi(t)$	A	+	+	-
$\alpha(t)$	A	+	+	-
$\beta(t)$	B	+	+	Wymagane są dwa odbiorniki mierzące pozycję (pomiar jednoczesny) w miarę możliwości odległe od siebie (np. na dziobie i na rufie modelu).
x(t); y(t)	A	+	+	-
$(l_{x+} m_{\varphi}), N$	C	+	-	Na podstawie przybliżonych obliczeń (zob. tabela 2), dla których danymi są pomiary okresu i amplitud kolysań swobodnych zamierzających. W przypadku statku niepraktyczne.
v(t)	B	+	+	Na podstawie x(t) i y(t).
R(t)	B	+	+	Na podstawie x(t) i y(t).
GM	B	+	+	Na podstawie pomiaru zmiany przechyłu wskutek przesunięcia znanej masy na znaną odległość (w bezruchu).
GM _p , GM _c	B	+	-	Na podstawie pomiaru zmiany przechyłu wskutek przesunięcia znanej masy na znaną odległość (w ruchu). Na statku w ruchu niepraktyczne.
M _R	A	+ lub C	- lub C	Pomiary na modelu wymagają skomplikowanej aparatury, są drogie. Na statku koszt instalacji aparatury powoduje niepraktyczność. Istnieją metody pozwalające oszacować moment przechylający spowodowany reakcją steru na podstawie charakterystyk geometrycznych steru (zob. tabela 2).
M _H	D	-	-	-

Oznaczenia użyte w pierwszej kolumnie tabeli 1 mają taką samą interpretację, jak w przypadku wzorów (2), (3) i (4). Dodatkowo użyto następujących oznaczeń:

- $\alpha(t)$ – kąt wychylenia steru (ujemny na prawą burtę);
- $\beta(t)$ – kąt dryfu;
- x(t), y(t) – współrzędne punktu (w funkcji czasu), w którym została zainstalowana antena odbierająca pozycję modelu;
- GM_p, GM_c – początkowa wysokość metacentryczna odpowiednio w ruchu prostoliniowym i w cyrkulacji.

W tabeli 1 zawarta jest ważna informacja: ani w przypadku ba-



Rys. 1. Typowy wynik pomiaru kąta przechyłu w funkcji czasu dla jednej próby.

dań modelowych, ani w przypadku badań w skali rzeczywistej nie można bezpośrednio zmierzyć momentu przechylającego generowanego na kadłubie statku.

3. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PAKIETU INFORMACJI

Gromadzenie wyników pomiarów zgodnie z pakietem zaprezentowanym w tabeli 1 daje szerokie możliwości analizy. Podstawową wartością jest to, że pomiar zmiany przechyłu modelu/statku w funkcji czasu pozwala także na określenie rzeczywistej prędkości kątowej i przyspieszenie kątoowe, będących także funkcją czasu. Szczególnie interesujące jest przyspieszenie kątoowe (druga pochodna) ze względu na to, że pomnożenie jej przez poprzeczny moment bezwładności statku powiększony o moment bezwładności masy wody towarzyszącej pozwala na określenie funkcji przedstawiającej zależność sumy wszystkich momentów przechylających (ΣM_{ki}), jakie działają na statek, od czasu. Znajomość tej sumy może pozwolić na analizę jej składników – jak one zmieniają się w funkcji czasu i jaki jest ich procentowy udział w danej chwili.

Jednym z atutów może być to, że funkcja $\varphi=\varphi(t)$, przedstawiająca zależność zmiany przechyłu od czasu, między chwilą wychYLENIA steru a chwilą osiągnięcia cyrkulacji ustalonej ma dwa miejsca zerowe (oznaczone na rysunku 2 punktami „0” i „3”), dwa ekstrema (punkty „2” i „5”) oraz co najmniej trzy punkty przegięcia (punkty „1”, „4” i „6”). Właściwości te pokazane są na rysunku 2 i podsumowane w tabeli 2.

Umożliwiają one upraszczanie równania (2) dla określonych przez pomiar czasów poprzez eliminację jednego ze składników. Na przykład w punkcie „1”, pokazanym na rysunku 2, eliminowany jest moment bezwładności. Równanie (2) przyjmuje wtedy postać:

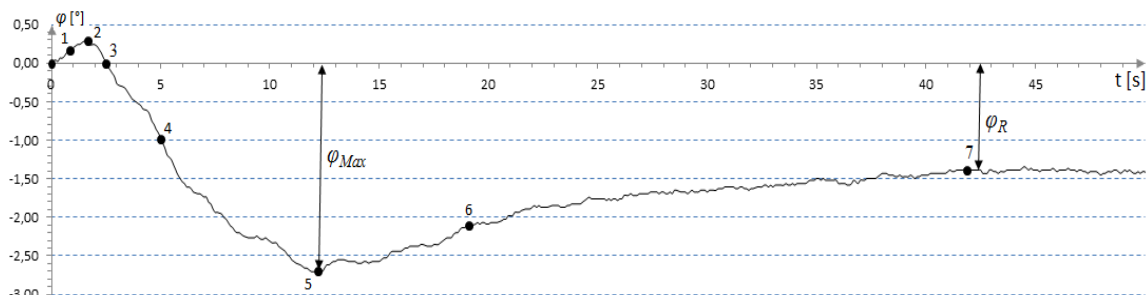
$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0$$

$$0 = N \cdot \frac{d\varphi}{dt}(t = t_1) - m \cdot g \cdot GZ(\varphi_1) + M_R(t_1) + M_H(t_1) \quad (5)$$

Analogicznie można wyeliminować z równania (2), w określonych przez pomiar czasach, moment tłumiący lub moment przywracający. Rysunek 2 jest powiększeniem drugiego etapu pokazanego na rysunku 1, z zastrzeżeniem, iż na osi rzędnych jest pokazana zmiana przechyłu w stosunku do przechyłu istniejącego w momencie rozpoczęcia wychylania steru.

Tab. 2. Opis znaczenia punktów wyróżnionych na rysunku 2.

Oznaczenie	Znaczenie	$\frac{d^2\varphi}{dt^2}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	$\varphi(t)$
0	Chwila, w której rozpoczęto wychylanie steru. Płatwa steru jest wychylona o kąt zero, jednakże posiada niezerową prędkość kątową na prawą burtę. W tym momencie statek płynie prostoliniowo. Przechył, prędkość kątoowa i przyspieszenie kątoowe przechyłu są równe zero.	0	0	0



Rys. 2. Zmierzona zmiana przechyłu modelu w funkcji czasu (ster wychylony na prawą burtę).

1	Chwila, w której krzywa $\varphi(t)$, obrazująca zmianę kąta przechyłu, ma punkt przegięcia. W tym momencie druga pochodna jest równa zero.	0		
2	Chwila, w której przechył statku na „wewnętrzną” burtę, w tym przypadku na prawą, jest największy. W tym momencie pierwsza pochodna jest równa zero.		0	
3	Chwila, w której zmiana przechyłu jest równa zero. Model płynie z tym samym przechylem, co w chwili „0”.			0
4	Chwila, w której krzywa $\varphi(t)$, obrazująca zmianę kąta przechyłu, ma punkt przegięcia. W tym momencie druga pochodna jest równa zero.	0		
5	Chwila, w której przechył statku na „zewnątrzną” burtę, w tym przypadku na lewą, jest największy. Według [4] ten przechył powinien być kryterium bezpieczeństwa. W tym momencie pierwsza pochodna jest równa zero.		0	
6	Chwila, w której krzywa $\varphi(t)$, obrazująca zmianę kąta przechyłu, ma punkt przegięcia. W tym momencie druga pochodna jest równa zero.	0		
7	Chwila, w której przechył statku stabilizuje się. Według [2] ten przechył jest kryterium bezpieczeństwa. W tym momencie pierwsza pochodna i druga pochodna są równe zero.	0	0	

Wskazany atut może być kluczowym dla prób określenia zależności momentu przechylającego powstającego na kadłubie statku w funkcji czasu $MH=MH(t)$, która jest jednym z „brakujących ogniw” na drodze do nowelizacji przepisu bezpieczeństwa, o którym mowa.

Aby na podstawie pomiarów i równania (2) wyznaczyć wielkość tego momentu, należy określić pozostałe momenty uwzględnione w tym równaniu: moment bezwładności, moment tłumiący, moment przywracający oraz moment siły oddziaływania steru. Najprostsze podejście, które może być pierwszym krokiem w analizie, zaprezentowane jest w tabeli 3. Równania ujęte w tabeli 3, znane w teorii okrętu [3], zakładają szereg uproszczeń (np. współczynnik tłumienia jest wartością stałą). Dla prostoty sformułowania kryteriów bezpieczeństwa warto stosować w modelu matematycznym uproszczenia. Natomiast krytycznie należy do nich podchodzić na etapie walidacji wyników obliczeń, otrzymanych np. metodą symulacyjną, wykorzystującą opracowany model matematyczny.

Obliczenie momentów wymienionych w tabeli 3 pozwoli, po odpowiednim przekształceniu równania (2), na obliczenie zależności momentu przechylającego powstającego na kadłubie statku od czasu. Istotą proponowanego podejścia jest to, iż ten moment nie jest obliczany na podstawie rozważań teoretycznych, których wyniki mają charakter przybliżony, lecz na podstawie pomiarów.

PODSUMOWANIE

Efektom wykonania odpowiednio dużej liczby pomiarów i analiz, opisanych wyżej, może być stworzenie bazy danych umożliwiających w przyszłości dokonanie uogólnień pozwalających na sfor-

Tab. 3. Sposób określenia wybranych momentów przechyłających

Parametr	Wielkości mierzone dla metody zaczerpniętej z [3]	Źródło danych będących funkcją czasu
<p>Moment bezwładności</p> $(I_x + m_\varphi) \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	$(I_x + m_\varphi) = \left(\frac{T_\varphi}{2 \cdot \Pi} \right)^2 \cdot \rho \cdot g \cdot V \cdot GM$ <ul style="list-style-type: none"> - okres kołysań zamierających T_φ - gęstość wody zaburtowej ρ - zanurzenia w celu określenia objętości podwodzia V, momentu bezwładności wodnicy I_B oraz wzniesienia środka wyporu KB - przechył ϕ spowodowany przesunięciem znanego ciężaru p na znaną odległość y: $GM = \frac{P \cdot y}{\rho \cdot g \cdot V \cdot tg(\phi)}$	<p>$\varphi = \varphi(t)$ dla końcówki czwartej fazy pomiaru – rysunek 2</p>
<p>Moment tłumiący</p> $N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$	$N = \frac{1}{\Pi} \cdot \ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{i+1}} \right) \cdot \sqrt{m \cdot g \cdot GM \cdot (I_x + m_\varphi)}$ <ul style="list-style-type: none"> - kolejne następujące po sobie amplitudy kołysań zamierających: φ_i oraz φ_{i+1} 	
<p>Moment przywracający</p> $m \cdot g \cdot GZ(\varphi)$	$GZ(\varphi) = GM \cdot \varphi(t)$ <ul style="list-style-type: none"> - przechył $\varphi = \varphi(t)$ 	<p>$\varphi = \varphi(t)$ dla drugiej fazy pomiaru – rysunek 2</p>
<p>Moment siły oddziaływania steru</p> $M_R(t)$	$M_R(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2(t) \cdot C_L(t) \cdot (KG - z_c)$ $C_L(t) = \frac{0,9 \cdot 2\Pi \cdot \lambda}{57,3 \left[\cos \Lambda \cdot \sqrt{\frac{\lambda^2}{\cos^4 \Lambda} + 4} + 1,8 \right]} \cdot \alpha(t) \pm \frac{C_{DC}}{\lambda} \cdot \left(\frac{\alpha(t)}{57,3} \right)^2$ <ul style="list-style-type: none"> - trajektoria ruchu $x=x(t)$; $y=y(t)$ w celu wyznaczenia prędkości postępowej $v=v(t)$ - kąt wychylenia steru $\alpha=\alpha(t)$ - parametry opisujące geometrię steru w celu wyznaczenia współczynników charakteryzujących ster: A, Λ, λ, C_{DC}, z_c - wzniesienie środka ciężkości: $KG = KB + \frac{I_B}{V} - GM$	<p>$\alpha = \alpha(t)$</p> <p>Cyrkulacja $x=x(t)$; $y=y(t)$</p>

mułowanie nowego przepisu bezpieczeństwa. Ponieważ rozpatrywane zjawisko ma charakter dynamiczny, podstawą fizyczną następnego kroku badań powinno być porównywanie prac poszczególnych momentów przechyłających – suma prac, wykonanych przez wszystkie momenty od chwili rozpoczęcia wychylenia steru do chwili maksymalnego przechyłu statku, powinna być równa energii potencjalnej statku przechylnego. Prawdopodobnie można także wykorzystać pojęcie pędu biorąc jako punkt wyjścia stwierdzenie, że przy przechyle maksymalnym pęd statku w kierunku kołysań bocznych jest równy zero. Trudność rozwiązania może polegać na tym, że szukana wartość (φ_{Max}) przy proponowanym podejściu jest zarówno granicą całkowania, jak i składnikiem funkcji podcałkowej, co może wymagać zastosowania metod symulacyjnych. Nie musi to stanowić problemu w przyszłości, ponieważ założenia przyjęte w [1] dopuszczają taką sytuację, w której kryterium może być procedurą (w aktualnej postaci kryterium jest kąt przechyłu). Jednakże na obecnym etapie jest zbyt wcześnie na decyzję o różnych możliwościach dalszych badań. Ich kierunek wytyczą wnioski z analizy zgromadzonych wyników pomiarów dla wielu statków/modeli o różnych charakterystykach.

BIBLIOGRAFIA

1. International Maritime Organization, document SLF 51/4/1, Annex 2, Framework for the Second Generation Intact Stability Criteria. London 2008.
2. International Maritime Organization, International Code on Intact Stability, Resolution MSC.267(85). London 2008.
3. Dudziak J., Teoria Okrętu. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2008.
4. International Maritime Organization, document MSC 89/22/7, Work Programme, Amendment to the 2008 IS Code – criterion for angle of heel in turns. London 2011.
5. Szozda Z., The need of the revision of passenger ships' stability criterion on account of turning. The Twentieth International Conference on Hydrodynamics in Ship Design, HYDRONAV'14, Wrocław 2014.
6. International Maritime Organization, document MSC 95/22, Report of the Maritime Safety Committee on its ninety-fifth Session, London 2015.

APPLICATION OF THE MEASUREMENTS TO THE MODELLING OF THE HEEL IN TURN IN THE CONTEXT OF THE PASSENGER SHIP STABILITY CRITERION

Abstract

Ships' stability criterion on account of turning is not up to date and requires amendments. Redesign of the criterion should be based on the scientific research. The measurements of ships' heel caused by turn in model scale or in full scale should be the base for the analysis. A data package is described, essential but at the same time being enough for the analysis, in particular for separation of the moment occurring on the ship's hull (the variable that cannot be directly measured) from other heeling moments acting on the ship in turn. The content of the package proposed in the paper was drawn up basing on conclusions from trials executed on ship models. Analysis of reasonable large data set should lead to criterion's amendment.

Autor:

dr inż. Zbigniew Szozda – Akademia Morska w Szczecinie; e-mail z.szozda@am.szczecin.pl