ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LII NR 2 (185) 2011

Adam Pawlędzio
Akademia Marynarki Wojennej

WYZNACZENIE KĄTA PRZECHYŁU DYNAMICZNEGO OKRĘTU NA PODSTAWIE BADAŃ MODELOWYCH

STRESZCZENIE

W opracowaniu przedstawiono rezultaty badań dynamicznego oddziaływania strumienia powietrza na model okrętu projektu 888. Badania przeprowadzono na stanowisku znajdującym się w Akademii Marynarki Wojennej. Wyniki wykonanych pomiarów porównano z obliczeniami teoretycznymi kąta przechyłu dynamicznego. Parametry wejściowe do badań i obliczeń określono zgodnie z zaleceniami przepisów Polskiego Rejestru Statków oraz IMO. Kluczowym zagadnieniem było określenie wartości momentu przechylającego od działania wiatru. Przeprowadzone badania wykazały, że przyjęty przez IMO i PRS sposób określania kryteriów stateczności dynamicznej okrętu zawiera margines bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe:
badania modelowe, kąt przechyłu dynamicznego, moment przechylający od działania wiatru.

WSTĘP

Okręt w czasie eksploatacji narażony jest na oddziaływania dynamiczne wynikające ze specyfiki środowiska morskiego. Wśród tych oddziaływań szczególne zagrożenie stanowi dynamiczne oddziaływanie wiatru połączone z falowaniem. Z tego też powodu instytucje klasyfikacyjne zamieszczają w swoich przepisach stosowne kryteria, które uwzględniają powyższe sytuacje. W kryteriach stateczności dynamicznej podaje się sposób obliczania momentu przechylającego pochodzącego od działania wiatru. Na podstawie funkcji tego momentu oraz krzywej ramion prostujących można wyznaczyć kąt przechyłu dynamicznego. Jednakże założenia i uproszczenia, które są przyjmowane przez instytucje klasyfikacyjne, powodują, iż niektóre zjawiska są pomijane i kąt przechyłu dynamicznego, wyznaczany na podstawie obliczeń

teoretycznych, jest inny niż rzeczywisty. Wyznaczenie rzeczywistej wartości kąta przechyłu dynamicznego jest możliwe na drodze badań modelowych wykonanych z uwzględnieniem skali podobieństwa geometrycznego i dynamicznego. W niniejszym artykule zamieszczono wyniki obliczeń teoretycznych i pomiarów kąta przechyłu dynamicznego przeprowadzonych na przykładzie modelu okrętu projektu 888 [4]. Rezultaty zamieszczonych badań pozwalają na sformułowanie praktycznych wniosków, które mogą być wykorzystane między innymi przez instytucje klasyfikacyjne.

STANOWISKO BADAWCZE ORAZ OBIEKT BADAŃ

Badania dynamicznego oddziaływania wiatru na okręt przeprowadzono na stanowisku znajdującym się w Akademii Marynarki Wojennej. Główne elementy stanowiska to:

— basen dla modeli okrętów nawodnych o wymiarach wewnętrznych *L*x*B*x*H* 3x2x0,5 m;
— model okrętu projektu 888;
— model okrętu projektu 660;
— komputer rejestrujący parametry położenia modelu okrętu;
— urządzenie generujące strumień powietrza.

Rys. 1. Stanowisko do dynamicznego oddziaływania wiatru

Źródło: fotografia wykonana przez autora.

Na krótszym boku basenu znajduje się zamontowany zestaw wentylatorów umieszczonych w obudowie stanowiącej dyszę o zmiennym przekroju. Wylot dyszy ma wymiary, które są wystarczające, aby strumień powietrza oddziaływał na całą powierzchnię boczną modelu z odpowiednim zapasem. W obudowie dyszy znajduje się pięć dużych oraz pięć małych wentylatorów, które w sumie są w stanie wygenerować strumień powietrza o prędkości ponad 5 m/s.

Obiektem badań był model okrętu projektu 888. Został on wykonany w skali 1:50 w stosunku do rzeczywistego okrętu. Jego podstawowe dane są następujące:

— długość całkowita modelu Lc = 1,444 m;
— długość między pionami Lpp = 1,284 m;
— wyporność modelu D = 13,15 kg;
— zanurzenie średnie okrętu T = 0,078 m;
— wysokość środka ciężkości modelu Z_G = 0,096 m.

W dziobnicy i tylnicy modelu na poziomie pływnicy wykonane są poziomo umieszczone otwory, które umożliwiają umieszczenie w nich żerdzi ograniczających dryf okrętu powodowany działającym strumieniem powietrza. Takie rozwiązanie powoduje, iż oś obrotu modelu okrętu została ustalona na sztywno. W rzeczywistości położenie osi obrotu okrętu nie jest stałe, gdyż zależy między innymi od dynamiki oddziaływania. Położenie osi obrotu jest istotne ze względu na określenie ramienia momentu przechylającego. W kodeksie stateczności IMO [1, 3] podaje się, że ramię momentu przechylającego należy obliczać jako odległość od środka powierzchni nawiewu do środka rzutu podwodnej części kadłuba na płaszczyznę symetrii lub w przybliżeniu do połowy zanurzenia statku. W związku z tym rezultaty pomiarów i obliczeń kątów przechyłu dynamicznego przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami IMO będą się różnić.

Na modelu zainstalowany jest czujnik kątów przechyłu i przegłębienia, który rejestruje kąty z dokładnością do 0,01 stopnia. Sygnały z czujnika przesyłane są drogą przewodową do komputera. Wpływ przewodów podłączonych do modelu został pominięty podczas obliczeń ze względu na ich małą masę i przekrój.

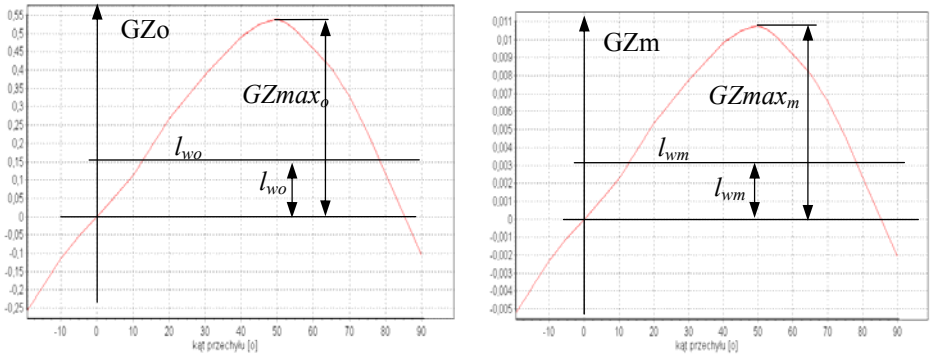
PROBLEM SKALI PODOBIEŃSTWA GEOMETRYCZNEGO I DYNAMICZNEGO

Rozwiązanie problemu skali podobieństwa geometrycznego i dynamicznego polegało na spełnieniu określonych warunków. Model okrętu został wykonany w skali 1:50, w związku z tym wszystkie wielkości geometryczne można było przeliczyć w prosty sposób. Wartości krzywej ramion prostujących modelu okrętu również podlegały prawu podobieństwa geometrycznego. Proporcjonalnie do wartości ramion prostujących okrętu powinien oddziaływać moment przechylający, to znaczy stosunek maksymalnej wartości ramienia prostującego GZ_{max} do wartości ramienia momentu przechylającego od działania wiatru l_w powinien być taki sam zarówno dla modelu, jak i dla okrętu:

$$\frac{GZ_{\max o}}{l_{wo}} = \frac{GZ_{\max m}}{l_{wm}} = const\,, \tag{1}$$

gdzie:
indeks o — dotyczy okrętu;
indeks m — dotyczy modelu.

Graficznym odwzorowaniem zależności (1) jest rysunek 2.



Rys. 2. Wykresy ramion momentów przechylających i prostujących od działania wiatru

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z [1] wartość momentu przechylającego od działania wiatru oblicza się w zależności od ciśnienia albo zgodnie z [6] w zależności od prędkość wiatru. W związku z powyższym ciśnienie (lub prędkość) należy określić z zachowaniem odpowiedniej dynamicznej skali w stosunku do modelu. Wartość ciśnienia działającego dynamicznie na obiekt rzeczywisty, tzn. statek, przyjęto zgodnie z przepisami IMO oraz PRS [1, 3, 5]. Dla statków o nieograniczonym rejonie pływania dla statycznie działającego wiatru wynosi ona 504 Pa, natomiast dla dynamicznie działającego wiatru podaje się wartość półtora raza większą, tzn. 756 Pa. Tej wartości ciśnienia odpowiada określona prędkość wiatru, którą można oszacować różnymi sposobami. Jednym z nich jest wykorzystanie zależności na ciśnienie dynamiczne:

$$p = \frac{\rho v^2}{2}\,, \tag{2}$$

gdzie:
ρ — dotyczy gęstości powietrza [kg/m^3];
v — dotyczy prędkości wiatru [m/s].

Dla wartości ciśnienia 756 Pa otrzymuje się prędkość wiatru wynoszącą 35 m/s, przy założeniu gęstości powietrza 1,2 kg/m^3. Do wyznaczenia prędkości wiatru w zależności od ciśnienia można posłużyć się również wartościami stabelaryzowanymi podanymi w literaturze [7]. Wynika z nich, iż dla wiatru o ciśnieniu 756 Pa prędkość powinna wynosić około 29 m/s.

Prędkość powietrza otrzymaną dla okrętu należy przeliczyć na prędkość dla modelu. Odpowiednich przeliczeń można dokonać różnymi metodami, na przykład wykorzystując liczbę Eulera [2]:

$$Eu = \frac{p}{\rho v^2}. \tag{3}$$

Dla ciśnienia 756 Pa i prędkości 32 m/s, określonych dla okrętu, otrzymuje się prędkość wiatru 4,52 m/s, jaka powinna oddziaływać na model. Należy nadmienić, iż liczba Eulera jest wykorzystywana do określania podobieństwa przepływów płynów nieściśliwych. W przypadku powietrza można przyjąć takie założenie upraszczające dla małych prędkościach wiatru.

W przypadku wykorzystania następującej zależności na moment przechylający od naporu wiatru [6]

$$\mathrm{M_w} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \mathrm{F_w} \cdot \mathrm{z_w} \cdot \mathrm{v_w^2} \cdot \cos^2\varphi \ \text{[t m]}, \tag{4}$$

gdzie:

F_w — dotyczy powierzchni bocznej nawiewu wiatru [m^2];

z_w — dotyczy odległości środka powierzchni nawiewu od wodnicy położonej na wysokości T/2 nad płaszczyzną podstawową w danym stanie załadowania [m];

φ — dotyczy kąta przechyłu [stopnie];

v_w — dotyczy prędkości wiatru na wysokości środka geometrycznego powierzchni nawiewu bocznego określonej według wzoru [6]:

$$\mathrm{v_w} = \mathrm{v_{10}}\left(\frac{\mathrm{z_w}}{10}\right)^{0,15} \ \text{[węzły]}, \tag{5}$$

gdzie:

v_{10} — dotyczy prędkości wiatru na wysokości 10 metrów powyżej linii wodnej, dla okrętów nieograniczonego rejonu żeglugi przyjmuje się v_{10} = 80 węzłów

dla modelu okrętu uzyskuje się wartość prędkości wiatru wynoszącą 4,51 m/s.

Przedstawione rozwiązania problemu skali podobieństwa dynamicznego prowadzą do zbliżonych wyników prędkości strumienia powietrza. W związku z tym można przypuszczać, iż obliczenia wartości prędkości wiatru zostały przeprowadzone prawidłowo.

REALIZACJA BADAŃ

Program badań zrealizowano w kilku etapach. Jednym z pierwszych było określenie rozkładu prędkości strumienia powietrza na stanowisku badawczym. Pomiar prędkości strumienia powietrza przeprowadzono w osiemnastu punktach. Wyniki pomiarów prędkości strumienia powietrza generowanego tylko przez duże wentylatory zamieszczono w tabeli 1. Średnia wartość prędkości strumienia powietrza oddziaływującego na model wynosiła 4,52 m/s.

Tabela 1. Wyniki pomiarów prędkości strumienia powietrza

Wysokość pomiaru	Miejsce pomiaru i wartość prędkości [m/s]						Wartość średnia [m/s]
	1	2	3	4	5	6	
35,5 cm	4,57	4,68	4,69	4,16	4,10	4,53	4,46
18,5 cm	4,67	4,86	4,77	4,53	4,16	4,65	4,61
8,5 cm	4,33	4,63	4,60	4,65	4,65	4,10	4,49
							4,52

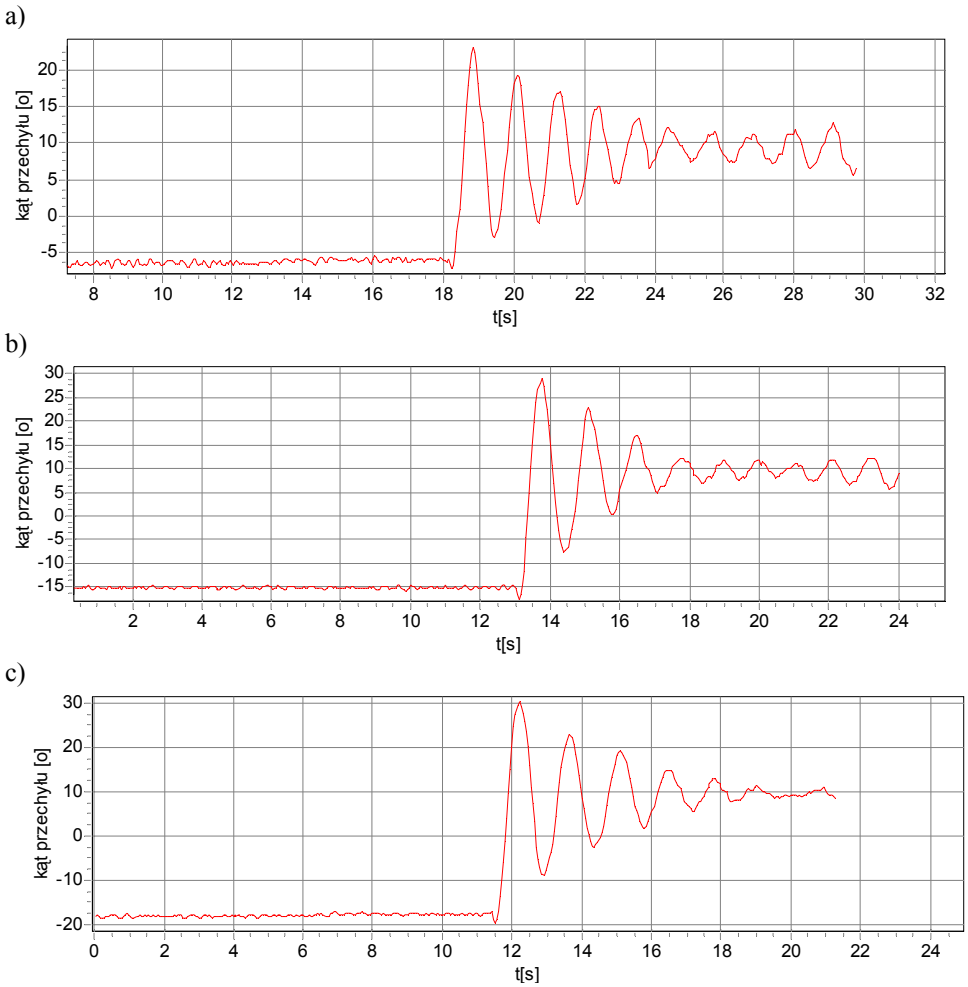
Następnym etapem badań było wyznaczenie kąta przechyłu dynamicznego. Badania na stanowisko przeprowadzono między innymi dla następujących wartości kątów przechyłu na burtę nawietrzną wynoszących 6°, 15°, 18°. Wartości tych kątów wynikają z obliczeń kryteriów pogody przeprowadzonych dla okrętu projektu 888 zgodnie z przepisami PRS i IMO.

Podczas rejestracji kąta przechyłu wentylatory pracowały ze stałą prędkością, co odpowiada stałej charakterystyce momentu przechylającego. Rezultaty pomiarów zarejestrowanych kątów przechyłu przedstawiono na rysunku 3.

Zestawienie wyników przeprowadzonych na stanowisku pomiarów zawiera Tabela 2. Największe wartości kąta przechyłu dynamicznego otrzymano gdy model był wychylony do kąta 18 stopni na butę nawietrzną.

Tabela 2. Wartości kątów przechyłu dynamicznego

	1	2	3
Kąt przechyłu na burtę nawietrzną [deg]	–6	–15	–18
Kąt przechyłu dynamicznego [deg]	23	29	31



Rys. 3. Pomiar kąta przechyłu dynamicznego po wychyleniu modelu na burtę nawietrzną do kąta: a) 6°; b) 15; c) 18°

Źródło: opracowanie własne.

OBLICZENIA TEORETYCZNE

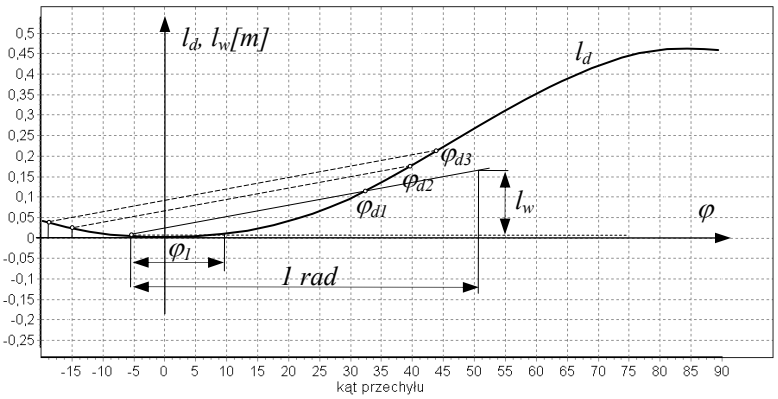
Obliczenia kąta przechyłu dynamicznego okrętu przeprowadzono dla momentu przechylającego określonego zgodnie z zaleceniami IMO i PRS. Zgodnie z nimi ramię dynamicznie działającego momentu przechylającego określono przy założeniu, że odległość środka powierzchni nawiewu bocznego została odmierzona od połowy zanurzenia. Poszukiwane ramię obliczono następującą zależnością [1, 3, 5]:

$$l_w = 1{,}5\frac{q_v F_w Z_v}{1000\ g\ D}[m],$$

gdzie:
q_v = 504 Pa — ciśnienie wiatru;
F_w — powierzchnia nawiewu wiatru [m^2];
Z_v — mierzona w pionie odległość środka powierzchni nawiewu do środka rzutu podwodnej części kadłuba na płaszczyznę symetrii lub w przybliżeniu do połowy zanurzenia statku, [m];
D — wyporność statku, [t];
g — 9,81 m/s^2.

Dla danych:
F_w =533 m^2
Z_v = 6,46 m
D = 1643,7 t
otrzymano wartość ramienia przechylającego od działania wiatru równą 0,162 m.

Dla tej wartości odczytano na wykresie (rys. 4.) kąty przechyłu dynamicznego i zamieszczono je w tabeli 3.



Rys. 4. Wyznaczenie kątów przechyłu dynamicznego dla okrętu projektu 888 dla Z_v = 6,46 m

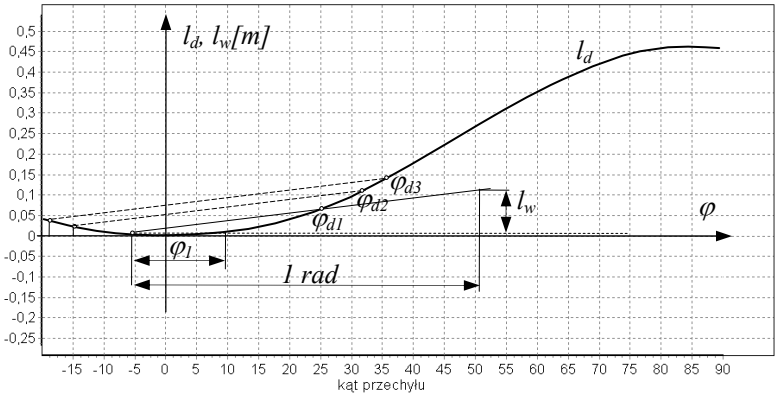
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Wartości kątów przechyłu dynamicznego

	1	2	3
Kąt przechyłu na burtę nawietrzną [deg]	–6	–15	–18
Kąt przechyłu dynamicznego [deg]	33	40	43

Uzyskane wyniki wskazują, iż wartości katów przechyłu dynamicznego otrzymanych z obliczeń są znacząco większe od wartości otrzymanych z pomiarów. Jedną

z przyczyn jest fakt, że ramię, na którym działa siła od naporu wiatru, zostało określone od połowy zanurzenia okrętu, a nie od wodnicy pływania. Jeżeli uwzględnimy powyższą uwagę, to dynamiczne ramię od działania wiatru l_w wyniesie 0,111 m. Dla tego przypadku wykonano kolejny wykres przedstawiony na rysunku 5., umożliwiający określenie kątów przechyłu dynamicznego. Wyznaczone wartości kątów przedstawiono w tabeli 4. Ponadto dla umożliwienia porównania wyników dołączono wiersz z wartościami kątów stateczności dynamicznej pomierzonymi na stanowisku badawczym.



Rys. 5. Wyznaczenie kątów przechyłu dynamicznego dla okrętu projektu 888 dla Z_v = 4,49 m
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Wartości kątów przechyłu dynamicznego

	1	2	3
Kąt przechyłu na burtę nawietrzną [deg]	–6	–15	–18
Kąt przechyłu dynamicznego wyznaczony z rysunku 5 [deg]	25	32	36
Kąt przechyłu dynamicznego pomierzony na stanowisku [deg]	23	29	31

Rozbieżności pomiędzy wartościami otrzymanych wyników obliczeń i pomiarów kąta przechyłu dynamicznego są tym razem mniejsze. Różnice wynoszą od dziesięciu do szesnastu procent. Uzyskanie bardziej zbliżonych do siebie wyników jest możliwe po uwzględnieniu w obliczeniach tłumienia ruchu oraz wielkości rzutu pola powierzchni nawiewu bocznego, która zmienia się w czasie przechyłu.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania dotyczące dynamicznego oddziaływania momentu przechylającego pochodzącego od wiatru wskazują na dużą zbieżność obliczeń

teoretycznych z wynikami pomiarów. Otrzymane rezultaty potwierdzają, że sposób określania ramienia przechylającego od działania wiatru ma istotny wpływ na wartości kątów przechyłu dynamicznego. Kolejne badania opisanego zagadnienia umożliwią przeprowadzenie dokładniejszej analizy.

BIBLIOGRAFIA

[1] *Code on Intact Stability of All Types of Ships Covered by IMO Instruments*, IMO, London 1993.

[2] Gryboś R., *Podstawy mechaniki płynów*, cz. 2, PWN, Warszawa 1998.

[3] *International Code on Intact Stability*, IMO, London 2008.

[4] Lewandowski G., *Badania modelowe stateczności dynamicznej okrętu projektu 888 poddanego oddziaływaniu wiatru* (praca dyplomowa), AMW, Gdynia 2010.

[5] *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich*, cz. IV, PRS, Gdańsk 2007.

[6] *Przepisy klasyfikacji okrętów wojennych*, cz. IV, *Stateczność i niezatapialność*, PRS, Gdańsk 2008.

[7] Wiliński A., Siemianowski T., *Teoria, konstrukcja i OPA okrętu. Zbiór zadań z teorii okrętu*, WSMW, Gdynia 1983.

DETERMINING ANGLE OF DYNAMIC HEEL FOR SHIP BASED ON MODEL INVESTIGATIONS

ABSTRACT

The paper deals with investigations into dynamic stability carried out for a model of type 888 ship. The investigations take into account geometric and dynamic similarity problem. Angle of heel caused by air flow is recorded and compared with calculations carried following recommendations by IMO. The results obtained indicate that the way to determine ship dynamic stability criteria adopted by IMO and PRS includes a margin of safety.

Keywords:

model investigations, angle of dynamic heel, heeling moment due to wind pressure.

Recenzent dr hab. inż. Jan Michalski, prof. AMW