

Nr 102/2017, 124–141
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

PREDYKCJA SKŁADOWEJ TŁUMIENIA KOŁYSAŃ BOCZNYCH STATKU DLA STĘPEK PRZECHYŁOWYCH. PORÓWNANIE SKRÓCONEJ I PEŁNEJ METODY IKEDY

BILGE KEEL ROLL DAMPING COMPONENT PREDICTION. COMPARISON OF THE SIMPLE AND FULL IKEDA'S METHOD

Wojciech Wawrzyński

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Wydział Nawigacyjny,
Katedra Eksploatacji Statku, e-mail: w.wawrzynski@wn.am.gdynia.pl

Streszczenie: Artykuł prezentuje porównanie wartości współczynnika tłumienia kołysań bocznych statku dla stępek przechyłowych, wyznaczonego przy zastosowaniu pełnej metody Ikedy oraz jej uproszczonej wersji. W materiale omówiono obie procedury wyznaczania wartości współczynnika tłumienia kołysań bocznych dla stępek oraz zaprezentowano wyniki obliczeń tego współczynnika dla drobnicowca. Przedstawiono również dla dwóch statków znacząco różniących się wielkością porównanie charakterystyk zmian współczynnika tłumienia dla stępek, w zależności od relacji szerokości stępek do ich długości, przy zachowaniu stałej wartości całkowitej powierzchni stępek. Wykonane obliczenia pokazują, że uproszczona metoda Ikedy, pomimo że opracowana została przy zastosowaniu metody regresji, z wykorzystaniem serii wyników uzyskanych metodą pełną, daje zbliżone wyniki obliczeń tylko dla małych amplitud kołysania statku i niewielkich wartości całkowitej powierzchni stępek przechyłowych.

Słowa kluczowe: kołysania boczne statku, stępki przechyłowe, tłumienie kołysań bocznych statku.

Abstract: This paper presents a comparison of the bilge keel component of roll damping, determined by the full Ikeda's method and its simplified version. The material discusses both procedures for determining the value of the bilge keel component and the calculation results for this component for the general cargo ship are presented. A comparison of the characteristics of value changes of bilge keel damping coefficients in dependence on the relationship of the bilge keel width to its length, while keeping the bilge keel area constant, is presented for two ships with significantly different particulars. Despite the fact that the simplified Ikeda's method was developed using the regression method for series results obtained by the full method, the calculations made present that the simplified method give comparable results only for small roll amplitudes and small bilge keels areas.

Keywords: ship rolling, bilge keel, roll damping.

1. WSTĘP

Tłumienie kołysań bocznych statków jest jednym z ważniejszych i cały czas aktualnych zagadnień, związanych z analizą ruchu statku na fali. Tak duże znaczenie tłumienia kołysań bocznych spowodowane jest tym, że jego wartość w znacznym stopniu determinuje wartości amplitud kołysań osiągniętych przez statek w danych warunkach falowania. Wartość tłumienia kołysań bocznych ma również znaczący wpływ na kąty przechyłu uzyskiwane przez statek, np. podczas dynamicznego uderzenia wiatru [Wawrzyński 2016].

Pierwsze analizy tłumienia kołysań bocznych statków prowadzone były już na początku XX wieku i dotyczyły wpływu stępek przechyłowych [Bryan 1900]. Jednak wzmożone badania rozpoczęto dopiero w połowie wieku. Zajęli się tym głównie Japończycy [Tanaka 1957–1959; Martin 1958; Kato 1958; Tasai 1965; Tamiya i Komura 1972; Ikeda, Himeno i Tanaka 1977, 1978]. Podsumowaniem badań zrealizowanych w tamtym okresie jest praca Himeno z roku 1981, (w języku japońskim) która pomimo upływu 35 lat traktowana jest jako jedno z podstawowych źródeł wiedzy na temat tłumienia kołysań bocznych.

Wyznaczenie dokładnych wartości momentu tłumiącego kołysania boczne statku na drodze obliczeń teoretycznych jest bardzo trudne. Przyczynę stanowią zjawiska związane z lepkością wody, powodujące znaczące i nieliniowe zmiany tłumienia w funkcji częstości oraz amplitudy kołysań bocznych, jak i prędkości postępowej statku. Stosowane są wprawdzie analityczne metody predykcji współczynników tłumienia kołysań, ale za najlepszą metodę cały czas uznawany jest jednak eksperyment (badania modelowe). Za eksperymentem przemawia również to, że prawie wszystkie składowe tłumienia kołysań bocznych są dobrze skalowane pomiędzy modelem i statkiem rzeczywistym. Wyjątek stanowi tłumienie związane z tarciem, ma ono jednak niewielki udział w całkowitej wartości tłumienia, a na dodatek może być dość dokładnie policzone bezpośrednio dla danego obiektu. Niestety, badania modelowe, pomimo że nie są skomplikowane, wymagają zbudowania modelu danej jednostki, dostępu do basenu badań modelowych, przeprowadzenia eksperymentu, jak i wykonania analizy pomierzonych wartości. Biorąc pod uwagę, wspomnianą wcześniej, zależność tłumienia od amplitudy i częstości kołysań oraz prędkości postępowej statku, aby uzyskać pełen obraz tłumienia kołysań bocznych, należałoby wyznaczyć trójwymiarową przestrzeń wartości współczynnika tłumienia, co wymaga wykonania niezmiernie dużej liczby eksperymentów. W efekcie procedura ta jest niezwykle czasochłonna i kosztowna. Problematyka wyznaczania współczynników tłumienia kołysań bocznych statku na bazie eksperymentu opisana jest w wielu publikacjach, np. we wspomnianej pracy Himeno z 1981 roku oraz w [Jang, Kwon i Lee 2010; ITTC 2011; Uzunoglu i Guedes Soares 2015; Wassermann, Feder i Abdel-Maksoud 2016].

Ostatnio poza stosowaniem metod analitycznych oraz badaniami modelowymi do symulacji kołysań bocznych statków oraz predykcji współczynników tłumienia zaczęto wykorzystywać również programy numerycznej mechaniki płynów, tzw. programy CFD (*Computational Fluid Dynamic*), czego przykładem mogą być prace [Sadat-Hosseini i in. 2011; Bo, Zuo-chao i Ming 2012].

Niezależnym i praktycznie do chwili obecnej nierozwiązanym problemem jest wyznaczanie oraz uwzględnianie w symulacjach numerycznych kołysań bocznych, wartości tłumienia dla amplitud przekraczających kąt wejścia pokładu do wody, jak i wyjścia obła oraz stępek przechyłowych z wody. Prace poświęcone temu zagadnieniu są jednak nieliczne [Bassler i Reed 2010].

2. PROGNOZOWANIE TŁUMIENIA KOŁYSAŃ BOCZNYCH

W przypadku braku możliwości wyznaczenia wartości współczynników tłumienia kołysań bocznych na podstawie badań modelowych dostępne są dwie metody alternatywne. Pierwsza z nich polega na wykorzystaniu wyników badań modelowych wykonanych dla jednostek o zbliżonym kształcie kadłuba, natomiast druga sprowadza się do obliczeń czysto teoretycznych, polegających na oszacowaniu i zsumowaniu wszystkich składowych tłumienia kołysań bocznych statku.

Druga z metod nazywana jest obecnie metodą Ikedy (*Ikeda's Method*) i pomimo że została opracowana ponad 30 lat temu, stosowana jest do chwili obecnej. Opis jej pierwotnej postaci znaleźć można w pracy Himeno z 1981 roku (nie jest tam jeszcze nazywana metodą Ikedy), natomiast wersję aktualną, niewiele różniącą się od pierwotnej, wśród procedur rekomendowanych przez ITTC [ITTC 2011]. Generalnie uważa się, że metoda oparta na sumowaniu poszczególnych składowych tłumienia jest dokładniejsza oraz zdecydowanie bardziej uniwersalna niż korzystanie ze współczynników tłumienia wyznaczonych dla jednostek podobnych.

Ze względu na zakres i złożoność obliczeń metoda Ikedy uważana jest za skomplikowaną. Aby rozwiązać ten problem, przygotowano, z wykorzystaniem metody regresji, jej uproszczoną wersję [Kawahara 2008]. Ponieważ pierwsza wersja metody zaproponowanej przez Kawaharę miała znaczące ograniczenia w jej stosowaniu, poprawioną wersję opracowano już przy współpracy m.in. Ikedy [Kawahara, Maekawa i Ikeda 2009, 2012]. Warto również zaznaczyć, że zależności przedstawione zarówno przy opisie pełnej, jak i uproszczonej metody Ikedy są zależnościami dla jednostek jednokadłubowych o typowym kształcie.

Prognozowanie tłumienia kołysań statku na bazie obliczeń teoretycznych, pomimo swoich ograniczeń i mniejszej wiarygodności wobec eksperymentu, jest zdecydowanie łatwiejsze w aplikacji, jak i tańsze, przez co jest powszechnie wykorzystywane w początkowych fazach projektowania statków oraz teoretycznych analizach zjawisk związanych z kołysaniami bocznymi statku na fali.

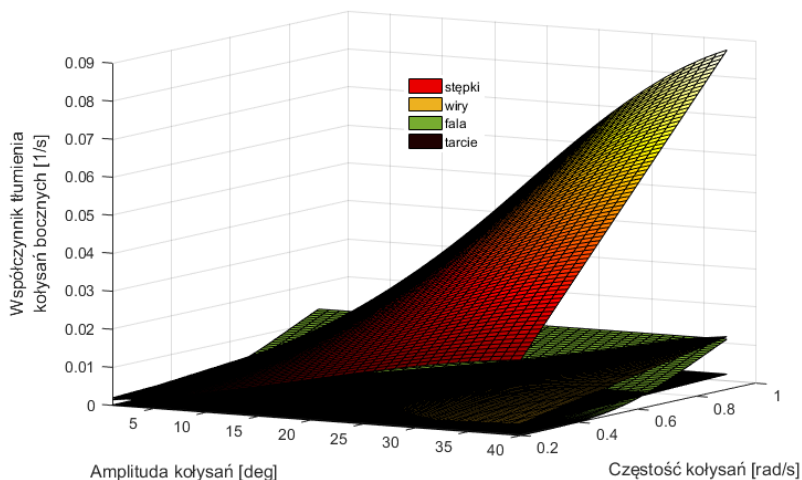
3. METODA IKEDY

W metodzie Ikedy przyjmuje się, że całkowita wartość ekwiwalentnego liniowego współczynnika tłumienia kołysań bocznych B_e równa jest sumie jego składowych związanych z: tarciem (B_F), falą (B_W), wirami (B_E), stępkami przechyłowymi (B_{BK}) oraz siłą pionową generowaną, podczas ruchu postępowego statku, na płaskiej powierzchni dna i elementach wystających, takich jak ster czy śruba (B_L):

$$B_e = B_F + B_W + B_E + B_{BK} + B_L \quad (1)$$

Spośród wszystkich składowych tłumienia kołysań bocznych największe znaczenie ma składowa, uwzględniająca działanie stępek przechyłowych B_{BK} . Składowa ta może stanowić od 50 do 80% całkowitej wartości tłumienia.

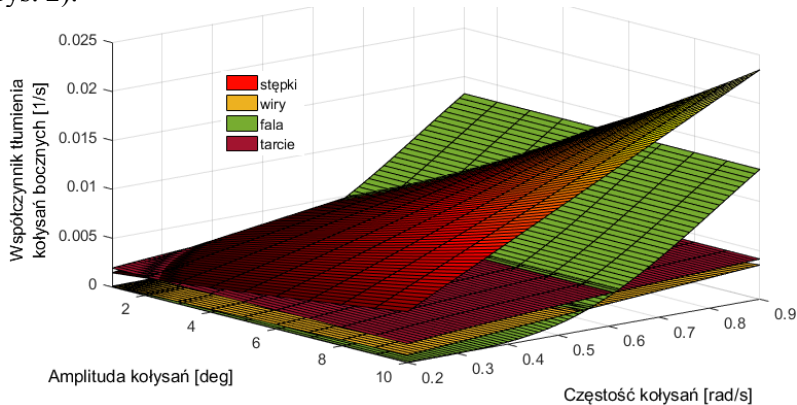
Aby pokazać wpływ składowej B_{BK} na całkowitą wartość tłumienia kołysań bocznych, na rysunkach 1 i 2 przedstawiono porównanie wszystkich składowych tłumienia wyznaczonych skróconą metodą Ikedy. Ponadto na rysunkach 1 i 2, jak i na wszystkich pozostałych zamieszczonych w artykule, prezentowane są wartości współczynników tłumienia uzyskiwane po podzieleniu B_{BK} przez poprzeczny moment bezwładności masy statku z uwzględnieniem momentu masy wody towarzyszącej kołysaniu. Tak policzony współczynnik zazwyczaj oznaczany jest symbolem μ z indeksem odpowiadającym danej składowej.



Rys. 1. Składowe tłumienia kołysań bocznych, dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), wyznaczone uproszczoną metodą Ikedy

Fig. 1. Roll damping components for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), calculated using the simple Ikeda's method

Rysunek 1 pokazuje wprawdzie dominujące znaczenie tłumienia wywołanego stępkami przechyłowymi, ale w zakresie małych amplitud kołysania, a w szczególności przy częstościach powyżej 0,6 rad/s, nie bez znaczenia są też pozostałe składowe tłumienia, które mogą nawet przewyższać tłumienie wywołane przez stępki (rys. 2).



Rys. 2. Składowe tłumienia kołysań bocznych, dla małych amplitud kołysania, dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$), wyznaczone uproszczoną metodą Ikedy

Fig. 2. Roll damping components for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$), calculated using the simple Ikeda's method, for small roll amplitudes

4. SKŁADOWA B_{BK} – PEŁNA METODA IKEDY

Stępki przechyłowe są najprostszym i zarazem najtańszym sposobem tłumienia kołysań bocznych statku. Najczęściej są wykonane w formie płaskownika lub płaskownika łebkowego o długości ok. 0,5–0,6 L_{PP} i szerokości ok. 0,012–0,018 B , umieszczonego na oble kadłuba w odległości co najmniej 0,3 L_{PP} od pionu dziobowego. W zależności od wymiarów stępki mogą powodować zmniejszenie amplitudy kołysań nawet do 35%. Praktycznie jedyną wadą stępek przechyłowych jest zwiększenie oporów ruchu kadłuba, które dla statku na wodzie spokojnej szacuje na poziomie do 2% całkowitej wartości oporu – dla statku na fali opór ten znacząco rośnie. Z drugiej strony wiadomo, że znaczące kołysania boczne również powodują spadek prędkości postępowej, więc zmniejszenie amplitud kołysania ograniczy zmniejszenie prędkości statku.

Wartość składowej B_{BK} zależna jest od amplitudy i częstości kołysań oraz od prędkości postępowej statku: $B_{BK} = f(\phi_a, \omega, Fr)$. Najczęściej całkowitą jej wartość oblicza się jako sumę tłumienia, związanego z siłą prostopadłą do powierzchni stępek B_{BKN} oraz tłumienia, będącego następstwem zmian pola ciśnień

i zakłóceń przepływu w warstwie przyściennej kadłuba (wywołanych obecnością stępek) B_{BKS} :

$$B_{BK} = B_{BKN} + B_{BKS} \quad (2)$$

Wartości składowych B_{BKN} oraz B_{BKS} wyznaczane są przy wykorzystaniu teorii paskowej, gdzie wartość tłumienia dla poszczególnych przekrojów poprzecznych kadłuba liczona jest według zależności:

$$B'_{BKN} = \frac{8}{3\pi} \rho l^3 b_{BK} \phi_a \omega f \left(22,5 \frac{b_{BK}}{\pi l f \phi_a} + 2,4 \right) \quad (3)$$

$$B'_{BKS} = \frac{4}{3\pi} \rho l^2 \phi_a \omega f^2 \int C_P l_P dG \quad (4)$$

$$f = 1 + 0,3e^{[-160(1-\sigma)]} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{S_S}{B_S T_S} \quad (6)$$

gdzie:

- σ – współczynnik pełnotliwości liczonego przekroju poprzecznego kadłuba,
- b_{BK} – szerokość stępki,
- l – odległość „czubka” stępek od osi obrotu statku,
- C_P – współczynnik uwzględniający, wywołane przez stępki, zmiany ciśnienia na powierzchni kadłuba,
- l_p – odległość powierzchni kadłuba od osi obrotu,
- G – długość zwilżonego obwodu przekroju poprzecznego.

Przy obliczaniu całki w zależności (4) zakłada się stały i niezakłócony wzrost ciśnienia z przodu stępki oraz zależne od amplitudy kołysań zmniejszenie ciśnienia w obszarze z tyłu stępki (określenia „przód” i „tył” stępki odnoszą się do kierunku obrotu kadłuba), zgodnie z zależnościami (7). Długość obszaru obniżonego ciśnienia z tyłu stępki S_0 może być wyznaczona zgodnie z zależnością (8).

$$C_P^+ = 1,2 \quad \text{ i } \quad C_P^- = -\frac{22,5 b_{BK}}{\pi l f \phi_a} - 1,2 \quad (7)$$

$$\frac{S_0}{b_{BK}} = 0,3 \frac{\pi l \phi_a f}{b_{BK}} + 1,95 \quad (8)$$

Dla założeń (7) oraz (8) wartość całki w zależności (4) wyznacza się według procedury podanej w podrozdziale 4.1.

Odległość czubka stępek od osi obrotu wyznaczana jest według formuły:

$$l = T \sqrt{\left[H_0 - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \frac{R}{T} \right]^2 + \left[1 - \frac{OG}{T} - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \frac{R}{T} \right]^2} \quad (9)$$

gdzie R – promień łuku obła przyjmowany zgodnie z regułą:

$$R = \begin{cases} 2T \sqrt{\frac{H_0(\sigma-1)}{\pi-4}} & \text{gdy } R < T \quad \text{i } R < 0,5B \\ T & \text{gdy } H_0 \geq 1 \quad \text{i } \frac{R}{T} > 1 \\ 0,5B & \text{gdy } H_0 \leq 1 \quad \text{i } \frac{R}{T} > H_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$H_0 = \frac{B_s}{2T_s} \quad (11)$$

Całkowite wartości obu składowych tłumienia od stępek wyznacza się poprzez obliczenie całek z B'_{BKN} oraz B'_{BKS} wzdłuż całej długości stępek l_{BK} :

$$B_{BKN} = \int B'_{BKN} dl_{BK} \quad (12)$$

$$B_{BKS} = \int B'_{BKS} dl_{BK} \quad (13)$$

Przy założeniu niezmiennego kształtu przekroju poprzecznego kadłuba, jak i stępek przechyłowych na całej ich długości, wartości składowych B_{BKN} i B_{BKS} mogą być policzone bezpośrednio, według wzorów:

$$B_{BKN} = \frac{8}{3\pi} \rho l^3 l_{BK} b_{BK} \phi_a \omega f \left(22,5 \frac{b_{BK}}{\pi l f \phi_a} + 2,4 \right) \quad (14)$$

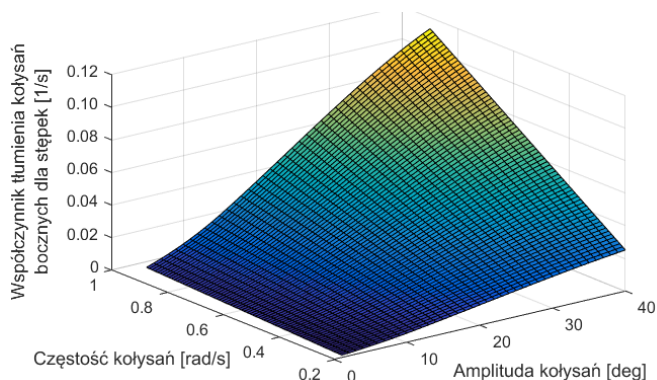
$$B_{BKS} = \frac{4}{3\pi} \rho l^2 l_{BK} \phi_a \omega f^2 \int C_p l_p dG \quad (15)$$

gdzie l_{BK} – długość stępek przechyłowych, a pozostałe parametry są takie same jak we wzorach (3) i (4).

Procedura wyznaczania wartości całki w zależności (15) jest również taka sama jak w (4).

Przykładowe wartości współczynnika tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych B_{BK} , policzone zgodnie z (14) i (15), prezentuje rysunek 3.

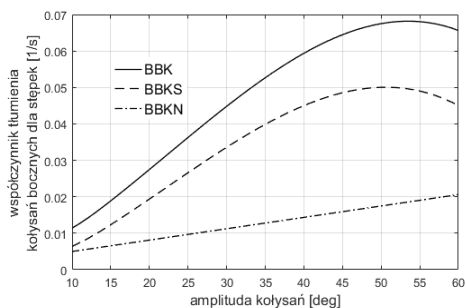
Na rysunku 4 pokazane są charakterystyki współczynników obu składowych tłumienia stępek (przypadek jak na rys. 1), przy takim samym całkowitym polu powierzchni stępek przechyłowych ($44,8 \text{ m}^2$), ale innej relacji b_{BK} do l_{BK} . Obliczenia wykonano dla częstości kołysań $0,50 \text{ rad/s}$ i wymiarów stępek: $b_{BK} = 0,56 \text{ m}$ i $l_{BK} = 40 \text{ m}$ (rys. 4a) oraz $b_{BK} = 1,12 \text{ m}$ i $l_{BK} = 20 \text{ m}$ (rys. 4b).



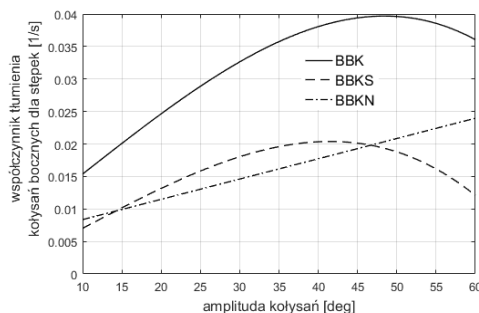
Rys. 3. Współczynnik tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych μ_{BK} , dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $b_{BK} = 0,56$ m, $l_{BK} = 40,00$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), przy założeniu stałego kształtu przekroju poprzecznego kadłuba na całej długości stępek

Fig. 3. Bilge keel damping coefficient μ_{BK} for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $b_{BK} = 0,56$ m, $l_{BK} = 40,00$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), for the constant cross section of the hull over the bilge keel length

a)



b)

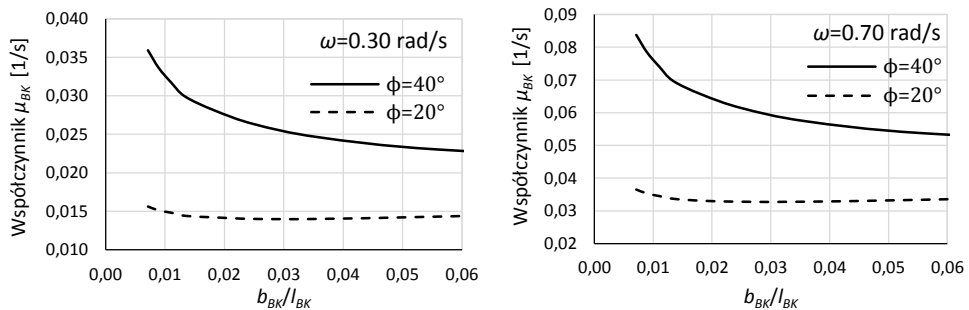


Rys. 4. Charakterystyki współczynnika tłumienia kołysań bocznych dla B_{BK} , B_{BKN} i B_{BKS} , przy identycznej powierzchni całkowitej stępek ($44,8$ m²), ale innej relacji b_{BK}/l_{BK} (statek jak na rys. 3). Obliczenia wykonano dla $\omega = 0,50$ rad/s oraz stępek o wymiarach: $b_{BK} = 0,40$ m i $l_{BK} = 56$ m (a) oraz $b_{BK} = 1,12$ m i $l_{BK} = 20$ m (b)

Fig. 4. Bilge keel damping coefficients for B_{BK} , B_{BKN} and B_{BKS} , for the same bilge keel area ($44,8$ m²) but for two different ratios b_{BK}/l_{BK} (the same ship as in Fig. 3). Calculations made for $\omega = 0,50$ rad/s and $b_{BK} = 0,40$ m, $l_{BK} = 56$ m (a) and $b_{BK} = 1,12$ m, $l_{BK} = 20$ m (b)

Wykresy na rysunku 4 pokazują, że tłumienie kołysań bocznych wywołane zmianami ciśnień w warstwie przyściennej kadłuba jest bardzo mocno zależne od długości stępek i stanowi czynnik determinujący ich skuteczność. Wprawdzie przy zachowaniu stałej wartości pola powierzchni stępek zwiększanie ich szerokości kosztem długości powoduje przyrost składowej B_{BKN} , ale związany z tymi zmianami spadek wartości B_{BKS} jest zdecydowanie większy, przez co zmniejsza się

również wartość całkowitego współczynnika tłumienia kołysań bocznych B_{BK} . Zależność ta nie jest jednak stała, co pokazują rysunek 5.



Rys. 5. Zmiany wartości współczynnika tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych μ_{BK} (statek jak na rys. 3), w zależności od b_{BK}/l_{BK} , przy identycznej powierzchni stępek ($44,8 \text{ m}^2$)

Fig. 5. Changes of the bilge keel damping coefficient μ_{BK} depending on the ratio b_{BK}/l_{BK} , for the constant value of the bilge keel area ($44,8 \text{ m}^2$). The same ship as in Fig. 3

Dla amplitudy kołysań 20° można przyjąć, że przy zachowanej stałej wartości pola powierzchni stępek relacja ich szerokości do długości b_{BK}/l_{BK} nie ma znaczącego wpływu na wypadkową wartość współczynnika tłumienia dla stępek – znaczenie ma wtedy praktycznie tylko całkowite pole powierzchni stępek przechyłowych.

Założenia, dla których przygotowana została formuła predykcji tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych powodują, że nie może być ona stosowana w przypadku kształtów kadłubów niektórych nowoczesnych jednostek, a w szczególności z rufą (*Buttock flow*). Dodatkowo, według badań eksperymentalnych opisanych w [Tanaka i in. 1981] zależności (3) i (4) dają znacząco przeszacowane wartości B_{BK} dla statków szerokich w stanach załadunku z niewielkim zanurzeniem. Natomiast według [Miyake i Ikeda 2013] problemy występują również w przypadku wszystkich kadłubów o mocno zaokrąglonym kształcie przekroju poprzecznego, tzn. bez wyraźnego podziału na burtę, dno i obłó o stosunkowo niewielkim promieniu, gdyż wtedy składowa B_{BKs} , liczona zgodnie z metodą Ikedy, przyjmuje znak ujemny.

Wartość tłumienia kołysań bocznych, wywołanego stępkami przechyłowymi uzależniona jest też od prędkości postępowej statku. Przybliżoną wartość B_{BKN} z uwzględnieniem prędkości postępowej u wyznaczyć można według formuły zaproponowanej w [Yuasa, Fujino i Motora 1979]:

$$B_{BKN,u} = B_{BKN} + \frac{\pi}{2} \rho b_{BK}^2 l^2 u \quad (16)$$

Według formuły (16) wzrost tłumienia kołysań bocznych stępek przechyłowych jest liniowo zależny od prędkości postępowej statku, przy czym jest on nieznaczny i zazwyczaj się go pomija. Jednak o ile wpływ prędkości postępowej

bezpośrednio na wartości B_{BKN} i B_{BKS} może być zignorowany, to według pracy (Ikeda i in. 1994) dla statku płynącego ze znaczną prędkością nie powinno się pomijać tłumienia wywołanego dodatkową pionową siłą, wytworzoną na powierzchni stępek B_{BKL} .

Ponieważ wartości B_{BKN} oraz B_{BKS} wyznaczone są bez uwzględnienia odległości stępek od swobodnej powierzchni wody, to w niektórych opracowaniach sugeruje się zastosowanie dodatkowej składowej B_{BKW} , uwzględniającej zmiany tłumienia dla stępek spowodowane falowaniem. Wprawdzie Himeno we wspomnianej pracy z 1981 roku uważa, że dla statków handlowych z typowymi szerokościami stępek przechyłowych, w granicach od 1/80 do 1/60 szerokości kadłuba, wpływ fali na B_{BK} jest pomijalny w relacji do innych składowych tłumienia (w szczególności przy małych wartościach amplitudy kołysań), to zaznacza jednak, że przy większych szerokościach stępek wpływ fali może mieć już znaczenie. Podkreśla też, że wpływ fali na B_{BK} może być istotny przy większych amplitudach kołysań bocznych, gdy odległość stępek od powierzchni wody drastycznie maleje lub gdy nastąpi wyjście stępek z wody. W związku z tym bardzo często podkreśla się, że opracowana przez Ikedę metoda predykcji współczynników tłumienia jest metodą tylko dla małych amplitud kołysania. Problem wpływu fali na B_{BK} przedstawiono w publikacji [Bassler i Reed 2009].

Na chwilę obecną, ze względu na małe wartości składowej B_{BKL} oraz trudności w dokładnym wyznaczeniu składowej B_{BKW} , są one praktycznie zawsze pomijane, a wartość B_{BK} wyznacza się, sumując tylko wartości B_{BKN} i B_{BKS} .

4.1. Wyznaczanie wartości całki $\int C_p l_p dG$ w zależności (4) i (14) według [ITTC 2011]

$$\int C_p \cdot l_p dG = T^2(-A_0 C_p^- + B_0 C_p^+)$$

$$A_0 = (m_3 + m_4)m_8 - m_2^2$$

$$B_0 = \frac{m_2^2}{3(H_0 - 0,215m_1)} + \frac{(1 - m_1)^2(2m_3 - m_2)}{6(1 - 0,215m_1)} + m_1(m_3m_5 + m_4m_6)$$

$$m_1 = \frac{R}{T}, \quad m_2 = \frac{OG}{T}, \quad m_3 = 1 - m_1 - m_2, \quad m_4 = H_0 - m_1$$

$$m_5 = \frac{0,414H_0 + 0,0651m_1^2 - (0,382H_0 + 0,0106)m_1}{(H_0 - 0,215m_1)(1 - 0,215m_1)}$$

$$m_6 = \frac{0,414H_0 + 0,0651m_1^2 - (0,382 + 0,0106H_0)m_1}{(H_0 - 0,215m_1)(1 - 0,215m_1)}$$

$$m_7 = \begin{cases} \frac{S_0}{T} - 0,25\pi m_1 & \text{dla } S_0 > 0,25\pi R \\ 0 & \text{dla } S_0 \leq 0,25\pi R \end{cases}$$

$$m_8 = \begin{cases} m_7 + 0,414m_1 & \text{dla } S_0 > 0,25\pi R \\ m_7 + 1,414m_1 \left(1 - \cos \frac{S_0}{R}\right) & \text{dla } S_0 \leq 0,25\pi R \end{cases}$$

Wartości σ , S_0 , R oraz H_0 wyznaczone są odpowiednio według zależności (6), (8), (10) oraz (11).

5. SKŁADOWA B_{BK} – UPROSZCZONA METODA IKEDY

W uproszczonej metodzie Ikedy tłumienie kołysań bocznych dla stępek wyznacza się dla zerowej prędkości postępowej statku bez możliwości korekty, przy czym liczona jest wartość bezwymiarowa tłumienia, oznaczana \hat{B}_{BK} [Kawahara, Maekawa i Ikeda 2009, 2012]:

$$\hat{B}_{BK} = A_{BK} \exp(B_{BK1} + B_{BK2} C_m^{B_{BK3}}) \hat{\omega} \quad (17)$$

Współczynniki A_{BK} , B_{BK1} , B_{BK2} i B_{BK3} obliczane są według zależności określonych metodą regresji:

$$x_1 = \frac{B}{T}, \quad x_2 = C_b, \quad x_3 = C_m, \quad x_4 = \frac{OG}{T}, \quad x_5 = \hat{\omega}, \quad x_6 = \phi_A [^\circ], \quad x_7 = \frac{b_{BK}}{B}, \quad x_8 = \frac{l_{BK}}{L_{PP}}$$

$$A_{BK} = f_1(x_1, x_2) \cdot f_2(x_6) \cdot f_3(x_7, x_8)$$

$$f_1 = (-0,3651x_2 + 0,3907) \cdot (x_1 - 2,83)^2 - 2,21x_2 + 2,632$$

$$f_2 = 0,00255x_6^2 + 0,122x_6 + 0,4794$$

$$f_3 = (-0,8913x_7^2 - 0,0733x_7) \cdot x_8^2 + (5,2857x_7^2 - 0,01185x_7 + 0,00189) \cdot x_8$$

$$B_{BK1} = (5x_7 + 0,3x_1 - 0,2x_8 + 0,00125x_6^2 - 0,0425x_6 - 1,86) \cdot x_4$$

$$B_{BK2} = -15x_7 + 1,2x_2 - 0,1x_1 - 0,0657x_4^2 + 0,0586x_4 + 1,6164$$

$$B_{BK3} = 2,5x_4 + 15,75$$

Związki pomiędzy \hat{B}_{BK} i B_{BK} oraz pomiędzy $\hat{\omega}$ i ω prezentują się następująco:

$$\hat{B}_{BK} = \frac{B_{BK}}{\rho V B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}, \quad \hat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad (18)$$

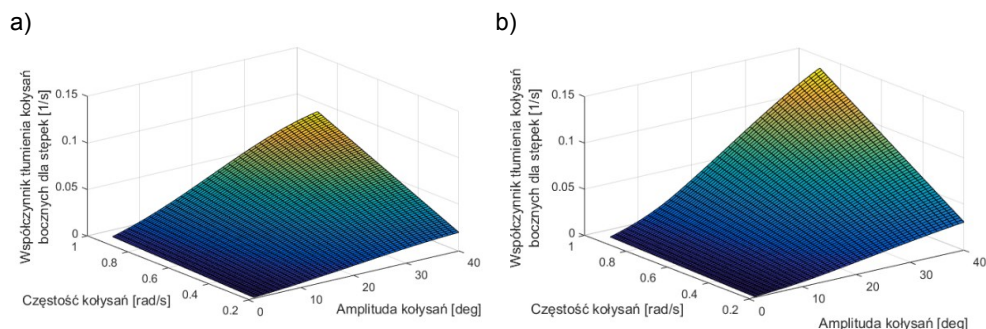
gdzie:

- V – objętość podwodzia,
- B – szerokość kadłuba,
- P – gęstość wody,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Wartość \hat{B}_{BK} , wyznaczona według formuły (17), uwzględnia zarówno działanie siły prostopadłej do powierzchni stępek, opisaną w metodzie pełnej przez B_{BKN} , jak i zaburzenia pola ciśnień, uwzględniane składową B_{BKS} . Przy czym zakres stosowania formuły (17) jest ograniczony do przypadków spełniających następującą grupę warunków:

$$\left\{ \begin{array}{lll} 0,5 \leq C_b \leq 0,85; & 0,9 \leq C_m \leq 0,99; & 2,5 \leq \frac{B}{T} \leq 4,5; \\ -1,5 \leq \frac{OG}{T} \leq 0,2; & 0,01 \leq \frac{b_{BK}}{B} \leq 0,06; & 0,05 \leq \frac{l_{BK}}{L_{PP}} \leq 0,4 \end{array} \right\} \quad (19)$$

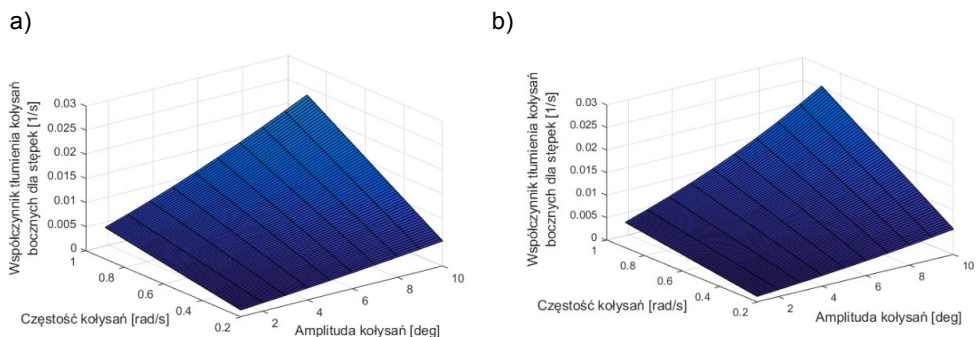
Przykładowe wartości współczynnika μ_{BK} , opisującego składową tłumienia kołysań bocznych dla stępek, wyznaczone metodą uproszczoną dla drobnicowca ze stępkami przechyłowymi o długości $l_{BK} = 56,00$ m ($0,40 L_{PP}$) i szerokości $b_{BK} = 0,40$ m, a więc o całkowitym polu powierzchni stępek $S_{BK} = 44,8$ m², prezentuje rysunek 6a. Rzeczywista długość stępek analizowanego statku jest większa, ale jednym z ograniczeń uproszczonej metody wyznaczania wartości \hat{B}_{BK} jest właśnie długość stępek, która nie może być większa niż $0,4 L_{PP}$. Dla porównania na rysunku 6b przedstawiono wartości współczynnika tłumienia dla stępek, dla tego samego stanu załadowania statku, wyznaczone pełną metodą Ikedy. Jak widać, w zakresie wysokich amplitud kołysania wartości współczynnika wyznaczone pełną metodą Ikedy są wyraźnie większe.



Rys. 6. Współczynnik tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych μ_{BK} , dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), wyznaczony uproszczoną (a) oraz pełną metodą Ikedy (b)

Fig. 6. Bilge keel damping coefficient for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method

Zdecydowanie lepiej wygląda porównanie współczynników w obszarze małych amplitud kołysania, co prezentuje rysunek 7.



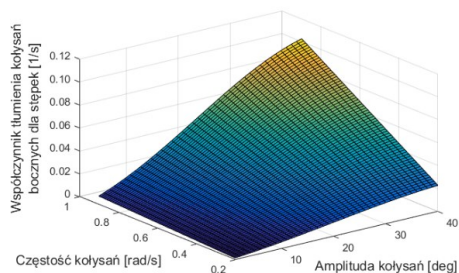
Rys. 7. Współczynnik tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych w zakresie małych amplitud kołysania, dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), wyznaczony uproszczoną (a) oraz pełną metodą Ikedy (b)

Fig. 7. Bilge keel damping coefficient for small roll amplitudes for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 56,00$ m, $b_{BK} = 0,40$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method

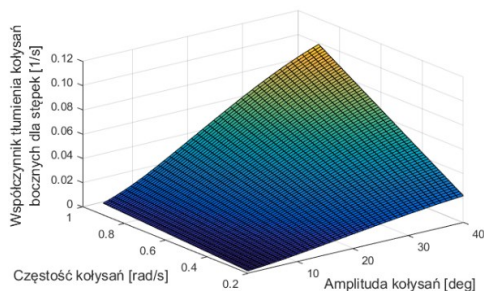
Oczywiście, nie zawsze różnice między metodami są tak znaczące jak na rysunku 6. Rysunek 8 przedstawia wyniki obliczeń wykonanych dla tego samego statku, przy tej samej powierzchni stępek przechyłowych, ale zmienionej relacji b_{BK}/l_{BK} . Zmniejszenie długości stępek o połowę dało zbliżone wyniki obliczeń obu metod, w szerokim zakresie częstości oraz amplitud kołysania. Zbliżone wartości μ_{BK} (rys. 8) nie oznaczają jednak, że dla krótkich stępek zawsze uzyskuje się zgodne wyniki obliczeń w uproszczonej i pełnej metodzie Ikedy. Rezultaty obliczeń wykonanych dla kilku statków o różnych wartościach C_b i C_m , różnych wymiarach ogólnych kadłuba oraz stępek przechyłowych, jak i różnej wartości parametru OG sugerują, że uproszczona metoda Ikedy w zakresie wyznaczania składowej tłumienia dla stępek przechyłowych wymaga jeszcze znaczącego dopracowania.

Przykładowo, porównując rysunki 6 i 8, można zauważyć, że w pełnej metodzie Ikedy zwiększenie stosunku b_{BK}/l_{BK} spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika tłumienia, co jest szczególnie widoczne w obszarze dużych amplitud kołysania. Taki sam kierunek zmian pokazuje również rysunek 5, natomiast w przypadku metody uproszczonej otrzymano odwrotny kierunek zmian (rys. 9).

a)

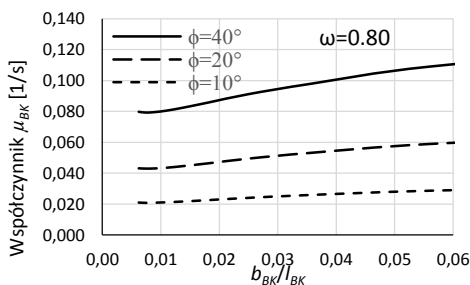
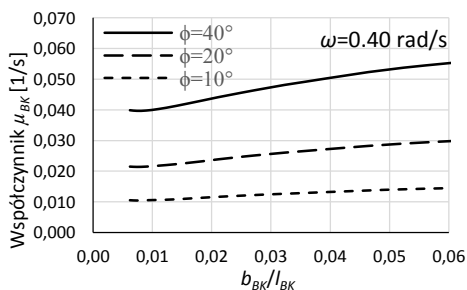


b)



Rys. 8. Współczynnik tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych μ_{BK} , dla drobnicowca ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 30,00$ m, $b_{BK} = 0,747$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), obliczony uproszczoną (a) oraz pełną (b) metodą Ikedy

Fig. 8. Bilge keel damping coefficient μ_{BK} for the general cargo ship ($L_{PP} = 140$ m, $B = 22$ m, $T = 6,00$ m, $l_{BK} = 30,00$ m, $b_{BK} = 0,747$ m, $C_b = 0,674$, $C_m = 0,94$), calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method



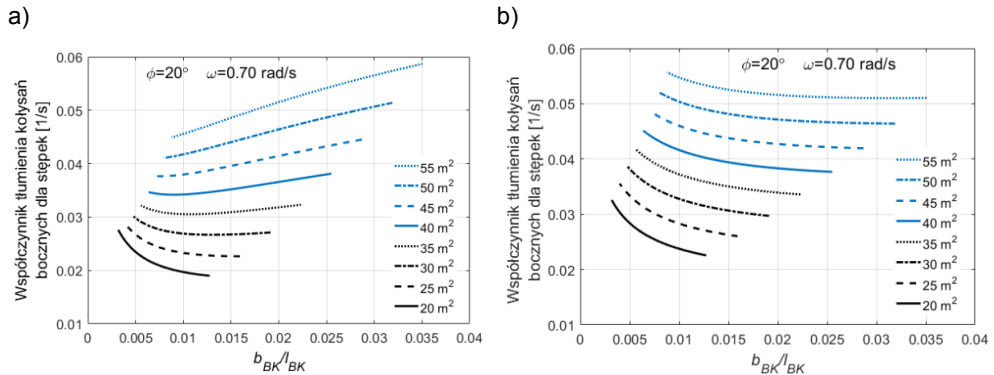
Rys. 9. Współczynnik tłumienia kołysań bocznych dla stępek przechyłowych μ_{BK} w zależności od relacji b_{BK}/l_{BK} , przy stałej powierzchni całkowitej stępek ($44,8$ m²), obliczony według zależności uproszczonej metody Ikedy (statek jak na rys. 3)

Fig. 9. Bilge keel damping coefficient μ_{BK} depending on the ratio b_{BK}/l_{BK} , for the constant value of S_{BK} ($44,8$ m²), calculated using the simple Ikeda's method. The same ship as in Fig. 3

Problem zgodności obu metod szerzej prezentują rysunki 10 i 11, gdzie przedstawiono, dla różnych wartości powierzchni całkowitej stępek S_{BK} , charakterystyki współczynnika μ_{BK} w zależności od relacji b_{BK}/l_{BK} . Obliczenia wykonano uproszczoną (rys.10a i 11a) oraz pełną metodą Ikedy (rys. 10b i 11b) dla dwóch statków znacząco różniących się wymiarami ogólnymi oraz współczynnikami pełnotliwości kadłuba.

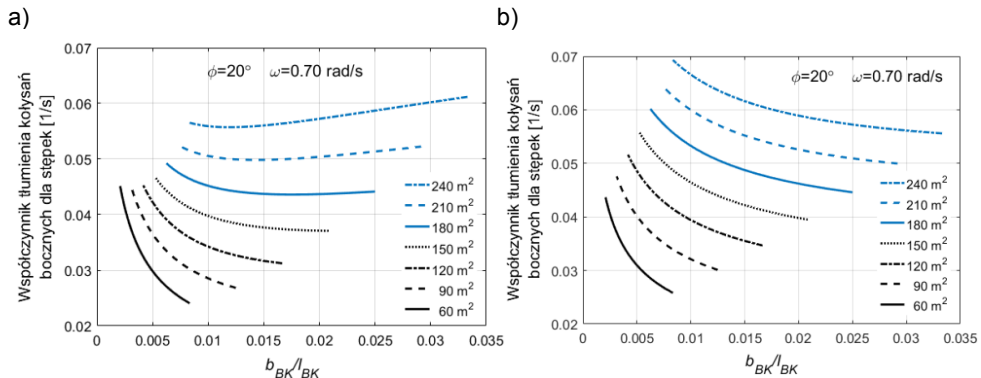
Wykresy na rysunku 10 dotyczą statku smukłego, natomiast na rysunku 11 – statku pełnotłiwego. Oba rysunki wyraźnie pokazują, dla amplitud kołysań 20°, że w przypadku pełnej metody Ikedy ogólna charakterystyka zmian współczynnika μ_{BK} w funkcji b_{BK}/l_{BK} jest stała dla wszystkich rozpatrywanych wartości S_{BK} ,

podczas gdy dla metody uproszczonej zmienia się w zależności od wartości tego pola. Na rysunku 10a odwrócenie charakterystyki wykresów występuje przy $S_{BK} = 35 \text{ m}^2$, a na rysunku 11 przy $S_{BK} = 210 \text{ m}^2$. Co ciekawe, w obu przypadkach wartość relacji S_{BK} do pola powierzchni prostokąta opisanego na wodnicy $L_{PP} \cdot B$ jest praktycznie identyczna ($\approx 0,0115$).



Rys. 10. Zmiany wartości μ_{BK} , w zależności od b_{BK}/l_{BK} przy różnych S_{BK} , dla amplitudy kołysań 20° , wyznaczone uproszczoną metodą Ikedy (a) oraz metodą pełną (b).
Drobnicowiec: $L_{PP} = 140 \text{ m}$, $B = 22 \text{ m}$, $T = 6,00 \text{ m}$, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$

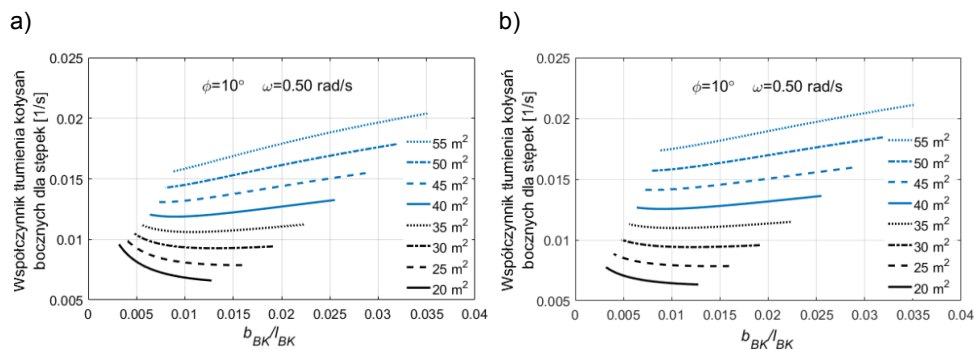
Fig. 10. Changes of the coefficient μ_{BK} depending on the ratio b_{BK}/l_{BK} , for different values of S_{BK} , for roll amplitude 20° , calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method.
The general cargo ship: $L_{PP} = 140 \text{ m}$, $B = 22 \text{ m}$, $T = 6,00 \text{ m}$, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$



Rys. 11. Zmiany wartości μ_{BK} , w zależności od b_{BK}/l_{BK} przy różnych S_{BK} , dla amplitudy kołysań 20° , wyznaczone uproszczoną metodą Ikedy (a) oraz metodą pełną (b).
Masowiec: $L_{PP} = 300 \text{ m}$, $B = 60 \text{ m}$, $T = 20,00 \text{ m}$, $C_m = 0,97$, $C_b = 0,81$

Fig. 11. Changes of the coefficient μ_{BK} depending on the ratio b_{BK}/l_{BK} , for different values of S_{BK} , for roll amplitude 20° , calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method.
The bulk carrier: $L_{PP} = 300 \text{ m}$, $B = 60 \text{ m}$, $T = 20,00 \text{ m}$, $C_m = 0,97$, $C_b = 0,81$

Należy jednak zaznaczyć, że w zakresie małych amplitud kołysania powyższe charakterystyki są dla obu metod zbliżone, dla wszystkich rozpatrywanych wartości pola powierzchni stępek, co dla przypadku drobnicowca pokazuje rysunek 12. Niestety, pomimo zgodności charakterystyk wykresów dla amplitudy kołysań 10° , nadal występują różnice pomiędzy wartościami współczynnika tłumienia wyznaczonego za pomocą obu metod. Przykładowo, dla $S_{BK} = 20 \text{ m}^2$ i $b_{BK}/l_{BK} = 0,005$, według metody uproszczonej $\mu_{BK} = 0,0082 \text{ s}^{-1}$, natomiast według metody pełnej $\mu_{BK} = 0,0071 \text{ s}^{-1}$, co oznacza 15% różnicę wartości współczynnika. W niektórych przypadkach uzyskuje się prawie idealną zgodność wyników, jak np. dla $S_{BK} = 30 \text{ m}^2$, gdzie różnica nie przekracza 4%.



Rys. 12. Zmiany wartości μ_{BK} , w zależności od b_{BK}/l_{BK} przy różnych S_{BK} , dla amplitudy kołysań 10° , wyznaczone uproszczoną metodą Ikedy (a) oraz metodą pełną (b).

Drobnicowiec: $L_{PP} = 140 \text{ m}$, $B = 22 \text{ m}$, $T = 6,00 \text{ m}$, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$

Fig. 12. Changes of the coefficient μ_{BK} depending on the ratio b_{BK}/l_{BK} , for different values of S_{BK} , for roll amplitude 10° , calculated using the simple (a) and full (b) Ikeda's method.

The general cargo ship: $L_{PP} = 140 \text{ m}$, $B = 22 \text{ m}$, $T = 6,00 \text{ m}$, $C_m = 0,94$, $C_b = 0,674$

6. PODSUMOWANIE

Uproszczona metoda Ikedy opracowana została przy zastosowaniu metody regresji w stosunku do wyników serii obliczeń wykonanych metodą pełną. Niestety, pomimo to zadowalająca zgodność obu metod występuje tylko w zakresie małych amplitud kołysania oraz przy relatywnie niewielkich wartościach całkowitej powierzchni stępek przechyłowych. Można do grupy warunków (19) dodać kolejne, w tym np. warunek dotyczący relacji całkowitej powierzchni stępek przechyłowych do pola powierzchni prostokąta opisanego na wodnicy lub bezpośrednio pola powierzchni wodnicy, czy też warunek maksymalnej wartości amplitudy kołysania, ale generalnie aktualną postać skróconej metody Ikedy należy uznać za niedopracowaną i wymagającą dalszych prac i poprawek.

Wyznaczenie prawidłowej wartości tłumienia dla stępek przechyłowych jest szczególnie ważne, gdyż, tak jak już wcześniej zaznaczono, może ono stanowić od 50 aż do 80% całkowitej wartości tłumienia kołysań bocznych. W związku z tym przy aktualnych rozbieżnościach wyników pełnej i uproszczonej metody wyznaczania składowej tłumienia dla stępek, lepiej jest korzystać jednak z zależności (14) i (15), tym bardziej, że ze względu na przyjęte założenie o stałym przekroju poprzecznym kadłuba na całej długości stępek nie są one bardziej złożone czy też kłopotliwe w stosowaniu niż formuła metody uproszczonej.

LITERATURA

- Bassler, C., Reed, A., 2009, *An Analysis of the Bilge Keel Roll Damping Component Model*, Proceedings of Tenth International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, St. Petersburg, s. 369–385.
- Bassler, C., Reed, A., 2010, *A Method to Model Large Amplitude Ship Roll Damping*, Proceedings of the 11th International Ship Stability Workshop, s. 217–224.
- Bo, Y., Zuo-chao, W., Ming, W., 2012, *Numerical Simulation of Naval Ship's Roll Damping Based on CFD*, Procedia Engineering, vol. 37, s. 14–18.
- Bryan, G.H., 1900, *The Action of Bilge Keels*, Transactions of the Royal Institution Naval Architects, vol. 42.
- Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., 1977, *On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull*, Journal of the Japan Society of Naval Architects, no. 142, s. 59–69, publikacja w języku japońskim cytowana przez (Kawahara i in., 2009, 2011).
- Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., 1978, *Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed*, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 143, s. 113–125, publikacja w języku japońskim cytowana przez ITTC (2011).
- Ikeda, Y., Katayama, T., Hasegawa, Y., Segawa, M., 1994, *Roll Damping of High Speed Slender Vessels*, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, vol. 222, s.73–78, publikacja w języku japońskim cytowana przez ITTC (2011).
- ITTC, 2011, ITTC Recommended Procedures, *Numerical Estimation of Roll Damping*.
- Jang, T.,Kwon, J., Lee, J., 2010, *Recovering the Functional Form of the Nonlinear Roll Damping of Ships from a Free-roll Decay Experiment: An Inverse Formulism*, Ocean Engineering, vol. 37, s. 1337–1344.
- Kato, H., 1958, *On the Frictional Resistance to the Rolling of Ships*, Journal of Zosen Kyokai, vol. 102, s. 115–122, publikacja w języku japońskim.
- Kawahara, Y., 2008, *Characteristics of Roll Damping of Various Ship Types and a Simple Prediction Formula of Roll Damping on the Basis of Ikeda's Method*, The 4th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, Taipei, s. 79–86.
- Kawahara, Y., Maekawa, K., Ikeda, Y., 2009, *A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Method and Its Limitations*, Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles.
- Kawahara, Y., Maekawa, K., Ikeda, Y., 2012, *A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Method and Its Limitations*, Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 2, s. 201–210.

- Martin, M., 1958, *Roll Damping due to Bilge Keels*, Report, Iowa University, Institute of Hydraulic Research, Iowa City.
- Miyake, T., Ikeda, Y., 2013, *A Study on Roll Damping of Bilge Keels for New Non-Ballast Ship with Rounder Cross Section*, Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, Brest.
- Sadat-Hosseini, H., Carrica, P., Stern, F., Umeda, N., Hashimoto, H., Yamamura, S., Mastuda, A., 2011, *CFD, System-based and EFD Study of Ship Dynamic Instability Events: Surf-riding, Periodic Motion, and Broaching*, Ocean Engineering, vol. 38, s. 88–110.
- Tamiya, M., Komura, T., 1972, *Topics on Ship Rolling Characteristics with Advance SPEED*, JSNA Japan, vol. 132, publikacja w języku japońskim.
- Tanaka, N., 1957, 1958, 1959 i 1961, *A Study on the Bilge Keels*, Part 1 to 4, JSNA Japan, vol. 101, 103, 105, 109, publikacje w języku japońskim.
- Tanaka, N., Himeno, Y., Ikeda, Y., Isomura, K., 1981, *Experimental Study on Bilge Keel Effect for Shallow Draft Ship*, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, vol. 180, s. 69–75, publikacja w języku japońskim cytowana przez Kawaharę i in., 2012.
- Tasai, F., 1965, *Equation of Ship Roll Motion*, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Report No.25, publikacja w języku japońskim cytowana przez ITTC (2011).
- Uzunoglu, E., Guedes Soares, C., 2015, *Automated Processing of Free Roll Decay Experimental Data*, Ocean Engineering, vol. 102, s. 17–26.
- Yuasa, K., Fujino, M., Matora, S., 1979, *New Approach to Hydrodynamic Forces on Oscillating Low Aspect Ratio Wings*, JSNA Japan, vol. 144, publikacja w języku japońskim.
- Wassermann, S., Feder, D., Abdel-Maksoud, M., 2016, *Estimation of Ship Roll Damping – A Comparison of the Decay and Harmonic Excited Roll Motion Technique for a Post Panamax Container Ship*, Ocean Engineering, vol. 120, s. 371–382.
- Wawrzyński, W., 2016, *Wyznaczanie kątów przechyłu dynamicznego statku za pomocą równania kołysań bocznych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 97, s. 167–178.