

Adam Pawłędzio
Akademia Marynarki Wojennej

BADANIA MODELOWE KOŁYSAŃ SWOBODNYCH OKRĘTU NA WODZIE SPOKOJNEJ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono rezultaty badań kołysań swobodnych modelu okrętu projektu 888. Doświadczenia przeprowadzono na basenie modelowym znajdującym się w Akademii Marynarki Wojennej. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczono okresy kołysań bocznych i wzdłużnych. Ponadto za pomocą zależności empirycznych obliczono dla modelu okrętu uogólnione masy wody towarzyszącej oraz odpowiednie wyrazy macierzy sił przywracających. Wyznaczone wartości wykorzystano następnie do obliczenia okresów kołysań bocznych i wzdłużnych modelu oraz dokonano ich porównania z wynikami doświadczeń.

Słowa kluczowe:

badania modelowe, oscylacje okrętu na wodzie spokojnej.

WSTĘP

W procesie projektowania statku jako złożonego systemu technicznego ważny problem stanowi zagadnienie prognozowania jego właściwości morskich. Zadanie to realizuje się głównie za pomocą badań modelowych prowadzonych przez wyspecjalizowane zespoły badawcze. W licznych ośrodkach naukowych równoległe do badań eksperymentalnych wykonuje się obliczenia rozpatrywanych parametrów za pomocą dedykowanego oprogramowania wykorzystującego nowoczesne metody numeryczne. Pozornie obydwie sposoby wzajemnie dublują się, gdyż wykorzystywane są do niemal tych samych celów. Teoretycznie najlepszym rozwiązaniem byłoby więc opracowanie jednej, uniwersalnej, a jednocześnie dokładnej i taniej metody możliwej do zastosowania do badań statków dowolnych typów. Badania modelowe w znacznym stopniu spełniają powyższe warunki, przy założeniu że dysponuje się odpowiednim (kosztownym) zapleczem laboratoryjnym, przygotowanym pod różne

typy statków. W przypadku metod obliczeniowych zaimplementowanych w specjalistycznym oprogramowaniu komputerowym można stwierdzić, że są wielokrotnie tańsze, a przy tym uniwersalne. Jednakże mają one jedną istotną wadę, z powodu której nie wyparły badań eksperymentalnych — podczas badań licznych zagadnień fizyki występują trudności w otrzymaniu wyników porównywalnych z badaniami eksperymentalnymi. Pomimo tego na zastosowanie komputerowych metod obliczeniowych decyduje się niemal każdy ośrodek badawczy. Producentami oprogramowania są zazwyczaj firmy mające odpowiednie doświadczenie w programowaniu metod numerycznych. Wiele ośrodków badawczych podejmuje trud opracowania własnych, niezależnych programów komputerowych, które są zorientowane problemowo na jedno szczególne zagadnienie. Atutem takich ośrodków jest posiadanie bazy laboratoryjnej, dzięki której można weryfikować i poprawiać kod programu komputerowego oraz założenia modelu fizycznego i matematycznego. Podążając za przykładem takich instytucji, w Akademii Marynarki Wojennej podjęto pierwsze kroki w kierunku badań właściwości morskich okrętów w oparciu o stanowisko badawcze i metody numeryczne. Kilka lat temu w uczelni powstało stanowisko badawcze, które umożliwiła przeprowadzenie badań na modelach okrętów w zakresie dotyczącym zarówno statyki, jak i dynamiki okrętu. Ponadto oprócz badań modelowych opracowywane są programy komputerowe wykonujące obliczenia z zakresu hydromechaniki okrętu. Rezultatem początkowych doświadczeń prowadzonych na stanowisku badawczym jest niniejszy artykuł. Zawiera on wyniki badań laboratoryjnych kołysań bocznych, kołysań wzdłużnych i nurzań modelu okrętu projektu 888 na wodzie spokojnej oraz obliczenia okresów kołysań bocznych i wzdłużnych wykonane za pomocą zależności analitycznych i empirycznych.

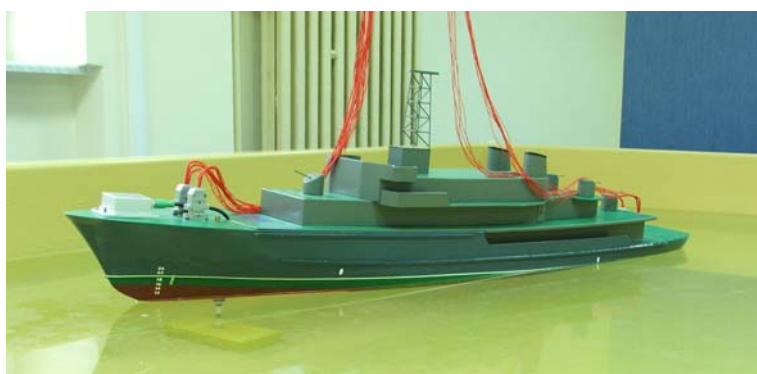
CEL I REALIZACJA BADAŃ

Celem opisywanego etapu badań jest wyznaczenie okresu nurzań, kołysań bocznych i wzdłużnych modelu okrętu na podstawie pomiarów dokonanych na stanowisku laboratoryjnym oraz przeprowadzenie analogicznych obliczeń za pomocą wzorów analitycznych i empirycznych. Badania zrealizowano na stanowisku do badań stateczności i niezatapialności znajdującym się w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Obiektem badań był model okrętu projektu 888 wykonany w skali 1:50. Podstawowe dane modelu są następujące:

- długość między pionami modelu $L = 1,284 \text{ m}$;
- szerokość modelu $B = 0,232 \text{ m}$;

- wyporność modelu $D = 13,15 \text{ kg}$;
- zanurzenie średnie modelu $T = 0,0785 \text{ m}$.

Kadłub modelu wykonano z laminatu poliestrowo-szklanego na podstawie rysunku linii teoretycznych, natomiast do budowy nadbudówki wykorzystano sklejkę. Podział wewnętrznej przestrzeni kadłuba modelu w przybliżeniu odpowiada okrętowi rzeczywistemu, z wyjątkiem jednego przedziału, który został podzielony wzdłużnie na trzy mniejsze. Podobnie jak okręt rzeczywisty opisany model ma stępki przechyłowe oraz dwie śruby napędowe i ster. Model okrętu wyposażono między innymi w czujnik kąta przechyłu i przegłębienia oraz czujnik zanurzenia średniego. Dokładniejszy opis tych przyrządów oraz miejsce ich montażu znajdują się w [4]. Określenie zanurzenia modelu odbywa się pośrednio poprzez pomiar ciśnienia hydrostatycznego względem powierzchni wody. Czujnik rejestruje pomiary z dokładnością 0,1 mm, natomiast inklinometr dokonuje pomiarów z dokładnością 0,01 stopnia. Dokładność przyrządów pomiarowych oszacowano podczas wielu doświadczeń prowadzonych na modelu. Sygnały elektryczne są transmitowane z modelu okrętu przewodami o znikomej masie do komputera, który w czasie rzeczywistym wyświetla i rejestruje pożądane parametry. Model okrętu projektu 888 wraz z podłączonymi przewodami przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model okrętu projektu 888 w basenie modelowym

Badania prowadzone są w basenie modelowym o wymiarach $l = 3 \text{ m}$, $b = 2 \text{ m}$, $h = 0,5 \text{ m}$, który jest wypełniony wodą do poziomu 0,4 m. Przy takich rozmiarach basenu pewnym utrudnieniem są fale odbite od jego brzegów, które zakłócają pomiary. Właśnie dlatego w analizie wyników brano pod uwagę kilkanaście pierwszych sekund ruchu modelu, gdy efekt odbicia fal jest niezauważalny.

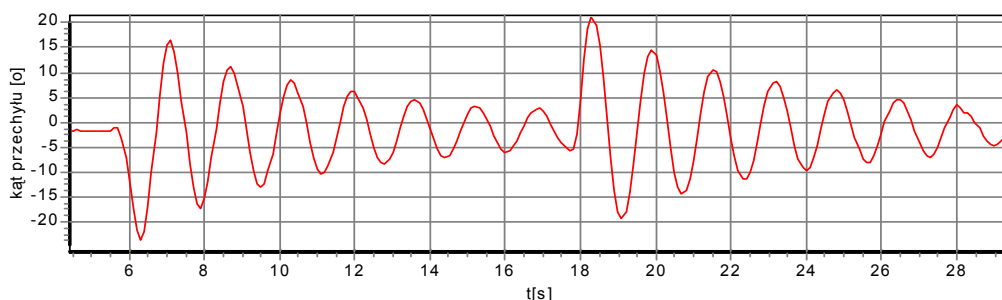
W czasie pomiarów rozpatrywanych parametrów model ustawiano równolegle do dłuższego boku basenu. Wszystkie przedziały modelu były puste. Miał on możliwość ruchu we wszystkich stopniach swobody (w wymaganych zakresach). Ruch swobodny modelu powodowano poprzez nadanie warunków początkowych różnych od zera. Starano się przy tym, aby zminimalizować zjawisko sprzężenia poszczególnych ruchów (głównie pomiędzy nurzaniem i kołysaniem wzdłużnymi). Pomiar rozpatrywanych parametrów odbywał się co 0,05 sekundy.

W początkowym okresie funkcjonowania stanowiska wielokrotnie przeprowadzano próby przechyłów dla modeli stanowiących jego wyposażenie. Na ich podstawie precyzyjnie określono położenie środka ciężkości modelu okrętu projektu 888 oraz wyznaczono jego wysokość metacentryczną, która wynosi obecnie 0,0083 m.

WYNIKI POMIARÓW PRZEMIESZCZEŃ MODELU OKRĘTU PROJEKTU 888

Kołysania boczne

Kołysania modelu okrętu zarejestrowano za pomocą czujnika, który mierzy jednocześnie dwa kąty: kąt przechyłu oraz kąt przegłębienia. Rezultaty pomiarów przedstawiono na rysunku 2.

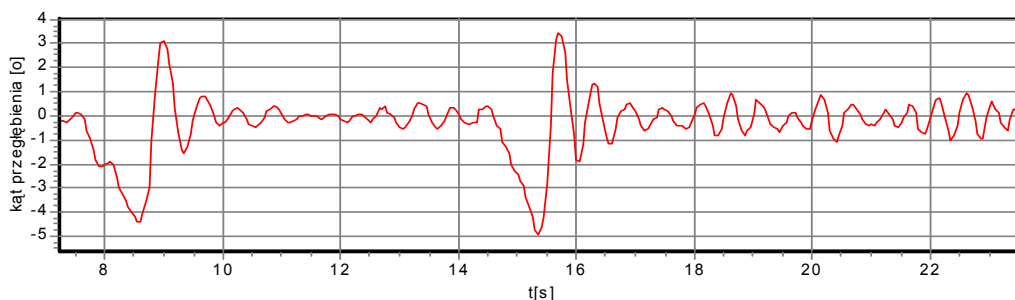


Rys. 2. Kołysania boczne modelu okrętu projektu 888 na wodzie spokojnej

Model okrętu został początkowo wychylony do kąta około 23 stopni na lewą burtę, a następnie kołysał się swobodnie przez blisko 12 sekund, po czym ponownie został wychylony do kąta około 21 stopni, lecz na burtę przeciwną. Z analizy przedstawionego przebiegu kołysań bocznych wynika, że ich okres wynosi 1,64 sekundy.

Kołysania wzdłużne

Pomiar kątów przegłębienia został przeprowadzony po ustaniu falowania wywołanego kołysaniami modelu okrętu. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 3.

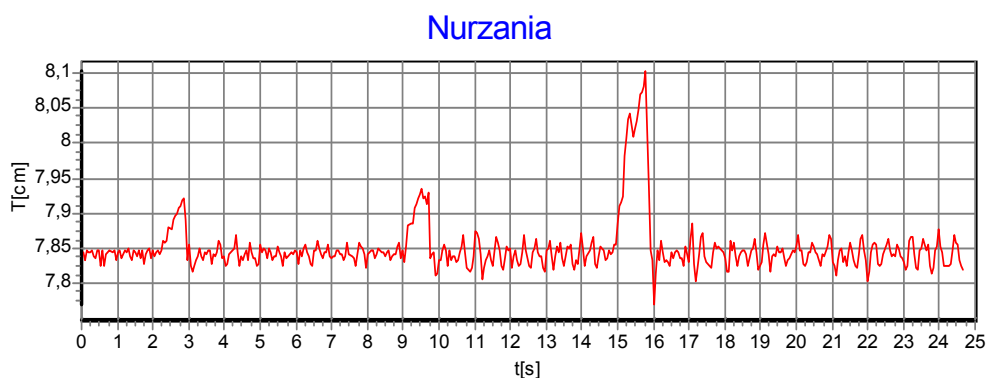


Rys. 3. Kołysania wzdłużne modelu okrętu projektu 888 na wodzie spokojnej

Początkowy kąt przegłębienia modelu wynosił około $-4,5$ stopnia. Po czasie około 6 sekund pojawiał się efekt odbicia fali od ścian basenu. Jego wpływ jest zauważalny w kolejnej próbie rejestracji ruchu kołysań wzdłużnych. Analiza kilku przebiegów kątów przegłębienia (niezamieszczonych w artykule) wykazała, że okres kołysań wzdłużnych wynosi 0,6 sekundy.

Nurzania

Z powodu zastosowanego sposobu pomiaru zanurzenia modelu okrętu przeprowadzenie poprawnych badań nurzań na opisywanym stanowisku w jego obecnej postaci jest utrudnione. Zastosowany czujnik (przetwornik) zanurzenia średniego funkcjonuje w ten sposób, że mierzy ciśnienie hydrostatyczne względem powierzchni wody. W czujniku jest otwór, w którym podczas pomiaru znajduje się powietrze. W czasie wzrostu zanurzenia powietrze jest sprężane poprzez dostającą się do niego wodę. Podczas pomiaru statycznego ściśliwość powietrza nie ma większego znaczenia, natomiast w trakcie pomiarów dynamicznych występują pulsacje, które zakłócają badanie. Ponadto w trakcie prowadzonych doświadczeń na stanowisku zaobserwowano, że podczas nurzań woda „wędruje” do góry z kadłubem, tzn. powierzchnia wody odkształca się. Stąd pomiar ciśnienia hydrostatycznego jest obarczony dodatkowym błędem. Rozwiązaniem tego problemu byłoby na przykład prowadzenie pomiaru odległości modelu od dna basenu. W obecnej postaci stanowisko laboratoryjne nie pozwala na przeprowadzenie takich badań. Wyniki pomiarów nurzań zarejestrowanych za pomocą opisanego czujnika zanurzenia przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Nurzania modelu okrętu projektu 888 na wodzie spokojnej

OBLICZENIA OKRESÓW OSCYLACJI MODELU OKRĘTU PROJEKTU 888

Kołysania boczne

Obliczenia okresu kołysań bocznych modelu okrętu projektu 888 dokonano za pomocą następującej zależności [1, 3, 7, 8]:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{I_x(1+k_{xx})}{W \overline{GM}}}, \quad (1)$$

gdzie: T_{φ} — okres kołysań bocznych [s];

I_x — moment bezwładności względem osi wzdłużnej przechodzącej przez środek ciężkości okrętu [kg m^2];

k_{xx} — współczynnik masy wody towarzyszącej podczas kołysań;

W — wypór okrętu [N];

\overline{GM} — wysokość metacentryczna poprzeczna [m].

Do wyznaczenia momentu bezwładności modelu względem osi wzdłużnej wykorzystano związek empiryczny Pawlenki [3, 7, 8]:

$$I_x = D \frac{B^2 + H^2}{16}, \quad (2)$$

gdzie: D — wyporność okrętu [kg];

B — szerokość okrętu [m];

H — wysokość boczna okrętu [m].

W efekcie okres kołysań bocznych obliczono następującą zależnością:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{B^2 + H^2}{16g} \frac{(1 + k_{xx})}{GM}}. \quad (3)$$

Współczynnik masy wody towarzyszącej odczytano z wykresu (zamieszczonego w [3]) na podstawie współczynnika pełnotliwości kadłuba, uwzględniając przy tym obecność stępek przechyłowych w modelu okrętu. Po podstawieniu następujących danych:

$$B = 0,2326 \text{ m};$$

$$H = 0,1112 \text{ m};$$

$$\overline{GM} = 0,0083 \text{ m};$$

$$k_{xx} = 0,35,$$

obliczono okres kołysań bocznych, otrzymując wartość 1,64 s.

Kołysania wzdłużne

Okres kołysań wzdłużnych modelu okrętu projektu 888 obliczono za pomocą następującej zależności [3, 7, 8]:

$$T_{\psi} = 2\pi \sqrt{\frac{I_y(1 + k_{yy})}{W \overline{GM}_L}}, \quad (4)$$

gdzie: I_y — moment bezwładności względem osi poprzecznej przechodzącej przez środek ciężkości okrętu [kg m^2];
 k_{yy} — współczynnik masy wody towarzyszącej podczas kołysań wzdłużnych;
 W — wypór okrętu [N];
 \overline{GM}_L — wzdłużna wysokość metacentryczna [m].

Do obliczenia poprzecznego momentu bezwładności posłużono się następującą zależnością empiryczną [5, 8]:

$$I_y = D(0,24L)^2. \quad (5)$$

Współczynnik masy towarzyszącej k_{yy} przyjęto jako równy 1,1. Jego wartość oszacowano na podstawie analizy porównawczej przeprowadzonej dla okrętów o zbliżonych kształtach i współczynnika pełnotliwości podwodzia. Po podstawieniu do zależności (4) następujących danych:

$$I_y = 1,248 \text{ kg m}^2;$$

$$k_{yy} = 1,1;$$

$$W = 129 \text{ N};$$

$$\overline{GM}_L = 1,72 \text{ m}$$

otrzymano okres kołysań wzdłużnych równy 0,68 s. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń okresów badanych ruchów modelu okrętu projektu 888 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wartości wyników pomiarów i obliczeń okresów oscylacji modelu okrętu projektu 888

Badany ruch modelu	Okresy oscylacji modelu okrętu [s]		Błąd względny [%]
	Wyniki pomiarów	Wyniki obliczeń	
Kołysanie boczne	1,64	1,64	–
Kołysanie wzdłużne	0,6	0,68	13

PODSUMOWANIE

Na podstawie porównania wyników pomiarów i obliczeń okresów oscylacji ruchu badanego modelu okrętu można stwierdzić, że zadowalające wyniki uzyskuje się już po zastosowaniu uproszczonych wzorów analitycznych oraz zależności empirycznych. Z doświadczenia wiemy, że tego stwierdzenia nie można uogólnić na wszystkie obiekty pływające. Ponadto różnorodność konstrukcji pływających sprawia, że nie dla wszystkich przeprowadzono szerokie badania, a w związku z tym nie sformułowano dla nich odpowiednich zależności empirycznych. Dlatego też w okrętownictwie oprócz badań modelowych zalecane jest między innymi opracowywanie i wykorzystywanie nowoczesnych technik obliczeniowych.

Badania modelowe z zakresu właściwości morskich okrętu były dotychczas realizowane w Akademii Marynarki Wojennej w bardzo wąskim zakresie i dla specyficznych konstrukcji, takich jak model okrętu podwodnego [2] oraz model szalupy [6]. Opisane w niniejszym artykule doświadczenia przeprowadzono na zupełnie nowym stanowisku dla modelu bardzo wiernie oddającego geometrię okrętu Marynarki Wojennej RP będącego nadal w eksploatacji. Dzięki nowemu stanowisku laboratoryjnemu, wyposażonemu w specjalistyczne czujniki oraz modele okrętów wykonane zgodnie z liniami teoretycznymi, poziom techniczny i jakość badań uległy znaczącej poprawie.

Opisane badania są etapem wstępnym do szerszej analizy zjawisk z zakresu hydromechaniki okrętu. Zamieszczone w artykule wyniki pomiarów zostaną w przyszłości wykorzystane do weryfikacji opracowywanych przez autora referatu programów komputerowych wykorzystujących metody numeryczne. Programy te posłużą do rozwiązania równia Laplace'a, a następnie do wyznaczenia rozkładu potencjału prędkości (w konsekwencji mas wody towarzyszącej) i ciśnienia w otoczeniu badanego obiektu oraz na swobodnej powierzchni wody. Dotychczasowa wersja programu umożliwia wykonanie obliczeń dla obiektów umieszczonych w toni.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dudziak J., *Teoria okrętu*, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2008.
- [2] Gniewszew J., *Wpływ swobodnej powierzchni wody na towarzyszące masy i momenty bezwładności okrętu podwodnego przy pływaniu w położeniu podwodnym*, Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej, Gdynia 1982.
- [3] Kabaciński J., *Stateczność i niezatapialność statku*, WSM, Szczecin 1993.
- [4] Mironiuk W., Pawłędzio A., Wróbel R., Zacharewicz M., *Badania modelowe stateczności i niezatapialności okrętów*, sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, Gdynia 2004.
- [5] Pawłowski M., *Liniowy model ruchów statku na fali nieregularnej*, „Raport Techniczny” 2001, nr 41, PRS.
- [6] Pawłędzio A., *Metoda wyznaczania mas wody towarzyszącej okrętu podczas kołysań swobodnych*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2008, nr 2.
- [7] Staliński J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1969.
- [8] *Zbiór zadań z teorii okrętu*, red. L. Kobyliński, PWN, Warszawa 1962.

MODEL-BASED RESEARCH OF SHIP ROLLING MOTION IN CALM WATER

ABSTRACT

The problem presented in the paper deals with the model research for ship type 888. The roll and pitch were taken into consideration. The periods of these degrees of freedom were

obtained from research and from calculations conducted with a simple experimental formulas. Despite the fact that the model of the ship has bilge kills, and some coefficients were approximated, the results of calculations are quite satisfactory as compared with the results obtained in the experiment.

Keywords:

model-base research, oscillations of ship in calm water.

Recenzent prof. dr hab. inż. Józef Lisowski