

## ANALIZA WYBRANYCH METOD OBLICZENIOWYCH I EKSPERYMENTALNYCH WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK AMPLITUDOWYCH JACHTU ŻAGLOWEGO NA FALI REGULARNEJ

*W artykule zaprezentowano wyniki analizy porównawczej charakterystyk amplitudowych właściwości morskich kadłuba jachtu żaglowego na fali regularnej, uzyskanych trzema metodami. Dwie z nich opierały się na podejściu obliczeniowym, trzecia zaś na klasycznym eksperymencie, przeprowadzonym na basenie modelowym. Zrewidowano użyteczność formuł empirycznych, opracowanych na bazie badań kadłubów jachtowych serii Delft. Wykonano symulacje komputerowe przy użyciu modelu numerycznego według teorii paskowej oraz wykonano badania modelowe w celu walidacji obu metod.*

*Dla wybranych warunków falowania porównano zachowania jachtu, które są charakterystyczne dla jego pływania w warunkach sfalowanej powierzchni akwenu wodnego, czyli nurzanie i kiwanie. Zbadano również przyrost oporu kadłuba od falowania.*

**Słowa kluczowe:** jacht żaglowy, opór dodatkowy na fali, metody przybliżone, badania modelowe, basen modelowy, właściwości morskie.

### WSTĘP

Zgodnie ze Stasiakiem dzielność morska obiektu pływającego, czyli jego zdolność do bezpiecznego i wystarczająco efektywnego funkcjonowania w każdych warunkach morskich, zależy przede wszystkim od kształtu kadłuba [Stasiak 2003]. W związku z tym na etapie projektowania jego geometrii powinno się przewidywać i brać pod uwagę te zachowania, które są charakterystyczne dla pływania w warunkach wzburzonego morza. Zasadniczym i bezpośrednim skutkiem oddziaływania fali na każdy typ statku są kołysania, czyli oscylacyjne ruchy w każdym z sześciu stopni swobody. Kołysania i falowanie są zawsze źródłem całego szeregu niepożądanych zjawisk (zalewanie pokładu, dodatkowe obciążenia dynamiczne kadłuba, przyspieszenia, wzrost oporu itp.), które stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa i efektywności żeglugi, dlatego optymalizacja kształtu kadłuba powinna być przeprowadzana z użyciem procedur i metod, w których zasadniczą rolę odgrywają praktycznie użyteczne modele właściwości morskich.

Powszechnie używa się liniowego modelu reakcji statku na nieregularne falowanie morza, którego podstawą są założenia, że układ fala – obiekt pływający jest dynamicznym układem liniowym, a falowanie nieregularne morza jest nieskończoną sumą elementarnych fal harmonicznym o rozkładzie losowym. W praktyce oddziaływanie morza na jacht można scharakteryzować zasadą super-

pozycji, poprzez złożenie sinusoidalnych fal regularnych o określonej amplitudzie i częstotliwości oraz falowania nieregularnego, scharakteryzowanego funkcją gęstości widmowej. Oznacza to, że problem prognozowania właściwości morskich w zakresie prognoz krótkoterminowych sprowadza się z hydromechanicznego punktu widzenia do wyznaczania charakterystyk amplitudowych tych właściwości, co można robić albo metodą badań modelowych albo obliczeń. Z praktycznego punktu widzenia skupia się to na wyznaczeniu:

- amplitud nurzań – pionowych ruchów środka ciężkości;
- amplitud kołysań wzdłużnych – obrotów wokół osi poprzecznej, przechodzącej przez środek ciężkości;
- oporu dodatkowego;

dla falowania regularnego o założonej wysokości fali oraz dla kursu jachtu względem propagacji falowania dla wybranej prędkości postępowej. Tak wyznaczone wielkości mogą być podstawą do dalszych rozważań na temat prognoz krótkoterminowego zachowania jachtu dla wybranego akwenu, na bazie jego widma falowania.

Ponieważ w procesie projektowym pożądane jest, aby stosować metody niewymagające długotrwałych obliczeń i zaangażowania dużej mocy obliczeniowej, przyjęto, że właściwe jest wybranie metod o nieskomplikowanej formie matematycznej. W przypadku oporu dodatkowego od fali, dla jachtów żaglowych formuły takie zostały określone w ramach badań *Delft Systematic Yacht Hull Series* (DSYHS). Wyróżniają się one prostą i elegancką strukturą, opartą na zestawie kilku stosunków parametrów głównych kadłuba i zbiorze współczynników regresyjnych, co pozwala na korzystanie z nich nawet bez konieczności używania komputera [Huetz i Alessandrini 2011]. Natomiast dla charakterystyk ruchów kadłuba, ale również wspomnianego wcześniej przyrostu oporu, istnieje wiele dostępnych narzędzi numerycznych (programów komputerowych) do predykcji właściwości morskich statku. Większość z nich wykorzystuje jedną z najbardziej efektywnych metod w tym zakresie – metodę paskową [Lloyd 1989].

Jednak mimo że w ostatnich latach miał miejsce dynamiczny rozwój technik komputerowych zarówno w warstwie sprzętowej, jak i oprogramowania, nadal dla potwierdzenia prognoz obliczeniowych finalną weryfikację wykonuje się z zastosowaniem metod eksperymentalnych. Badania przeprowadza się na basenie holowniczym z użyciem geometrycznie podobnego modelu statku rzeczywistego w skali.

Należy zwrócić również uwagę na dość ograniczoną liczbę publikacji, poświęconych analizie dzielności morskiej jachtów w zakresie jej włączenia do procesu projektowego, opartego na nieskomplikowanych metodach obliczeniowych, które mogą być wykorzystywane np. przez projektantów amatorów. Niniejsza publikacja ma częściowo uzupełnić tę lukę.

## 1. CEL BADAŃ

Podstawowym celem badań była analiza porównawcza wyznaczania wybranych właściwości morskich, określonych na podstawie wzorów empirycznych poprzez porównanie otrzymanych na ich podstawie wyników z rezultatami symulacji komputerowych i badań eksperymentalnych, wykonanych na basenie holowniczym.

Na potrzeby rewizji badawczej właściwości morskie rozumiane były jako charakterystyki amplitudowe ruchów i współczynnika przyrostu oporu na falach regularnych. Dla tak określonych charakterystyk, po dobraniu widma falowania oraz parametrów fali nieregularnej – wysokości fali  $H_{1/3}$  i okresu falowania  $T$  możliwe jest uzyskanie prognoz krótkoterminowych dla falowania nieregularnego.

Ogólny program badań zawierał następujące czynności: wyselekcjonowanie przydatnej metody uproszczonej na bazie studium literatury przedmiotu, o prostej matematycznej strukturze, możliwej do zaadaptowania do arkusza obliczeniowego oraz wykonanie symulacji numerycznych i badań modelowych. Prace zostały przeprowadzone dla kadłuba współczesnego jachtu żaglowego.

Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu nowoczesnych narzędzi komputerowych (metoda paskowa wraz z modyfikacjami). Badania modelowe przeprowadzono na basenie holowniczym dla modelu jachtu w skali.

## 2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był 43-stopowy współczesny jacht turystyczny, którego projekt opracowywany jest w stoczni Delphia Yacht z Olecka [Kijewski 2017].

Na rysunku 1 zaprezentowano model cyfrowy kadłuba jachtu, dostarczony przez producenta w ramach prowadzonych badań, dostosowany do wymogów metod obliczeniowych. Można zauważyć cechy kształtu, będące wyróżnikiem nowoczesnego jachtingu, takie jak: odwrótne dziobnica, szeroka i wyporna część rufowa oraz wyraźna linia załamania przekrojów poprzecznych powyżej obła.



Rys. 1. Model powierzchniowy bryły kadłuba

### 3. PROGRAM BADAŃ

W programie badań zdefiniowano opisane poniżej metody, poddane analizie porównawczej i użyte w dalszej części artykułu do analizy właściwości morskich jachtu. W punkcie 4.2 i 4.3 wskazano metody obliczeniowe wykorzystane w analizie. Dodatkowo w celu walidacji modeli numerycznych przeprowadzono badania eksperymentalne w basenie modelowym, co opisano w punkcie 5. Natomiast w punkcie 4.4 opisano warunki obciążeń (falowanie morskie), dla których przeprowadzono badania.

#### 3.1. Wielkości analizowane

Przyjęto następujący schemat analizy. Dla wielkości oporu dodatkowego od falowania porównano charakterystyki amplitudowe otrzymane na podstawie metody przybliżonej (oznaczonej jako PC; pkt 4.2), metod zaawansowanych (oznaczonych jako CS; pkt 4.3) i badań modelowych (oznaczonych jako EFD; pkt 5). W przypadku charakterystyk ruchów jachtu na fali zrewidowano metodę zaawansowaną (CS; pkt 4.3) przez wyniki eksperymentalne (EFD; pkt 5).

Otrzymane charakterystyki amplitudowe przedstawiono w formie bezwymiarowych funkcji przenoszenia zgodnie ze wzorami podanymi poniżej:

- kołysania wzdłużne  $\phi_A$ :

$$H_{\phi,\zeta}(\omega) = \frac{\phi_A(\omega) \cdot g}{\zeta_A(\omega) \cdot \omega^2} \quad (1.1)$$

- nurzania  $z_A$ :

$$H_{z,\zeta}(\omega) = \frac{z_A(\omega)}{\zeta_A(\omega)} \quad (1.2)$$

- opór dodatkowy  $R_{aw}$ :

$$R_{aw}(\omega) = \frac{\Delta R_W(\omega) \cdot L_{WL}}{\zeta_A(\omega)^2 \cdot \rho \cdot g \cdot B_{WL}^2} \quad (1.3)$$

gdzie:

- $H$  – bezwymiarowe charakterystyki amplitudowe,
- $\omega$  – częstotliwość kołowa fali,
- $\zeta_A$  – amplituda fali,
- $\phi_A$  – amplituda kołysań,
- $z_A$  – amplituda nurzań,
- $\Delta R_W$  – przyrost oporu na fali,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $\rho$  – gęstość wody,
- $L_{WL}$  – długość na wodnicy pływania,
- $B_{WL}$  – szerokość na wodnicy pływania.

### 3.2. Metoda obliczeniowa uproszczona

Przyjęta metoda bazuje na pracach Reumera z 1997 roku [Reumer 1997], rozszerzonych przez projekt Hommy w 2003 roku [Homma 2003]. Opracowany wielomian regresyjny został wyprowadzony dla jachtów z serii DELFT (*Delft Systematic Yacht Hull Series – DSYHS*) i pozwala na określenie charakterystyki amplitudowej  $H$  (*Response Amplitude Operator – RAO*) dla oporu dodatkowego od fali (*Added Resistance in Waves –  $R_{aw}$* ) w formie bezwymiarowej. Formuła ma następującą postać (1.4) [Keuning, Vermeulen i ten Have 2006]:

$$\frac{R_{aw}}{\rho \cdot g \cdot L_{wl} \cdot \zeta^2} = a_0 + a_1 \left(\frac{L_{wl}}{\nabla^{1/3}}\right) + a_2 \left(\frac{L_{wl}}{\nabla^{1/3}}\right)^2 + a_3 \left(\frac{L_{wl}}{\nabla^{1/3}}\right)^3 + a_4 \left(\frac{L_{wl}}{B_{wl}}\right) + a_5 \left(\frac{L_{wl}}{B_{wl}}\right)^2 + a_6 \left(\frac{B_{wl}}{T}\right) + a_7 C_p + a_8 C_p^2 + a_9 C_p^3 \quad (1.4)$$

gdzie:

- $a_{0..9}$  – współczynniki regresyjne,
- $R_{aw}$  – opór dodatkowy [N],
- $\nabla$  – objętość wyporności [m<sup>3</sup>],
- $\rho$  – gęstość ośrodka [kg/m<sup>3</sup>],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie, 9,81 [m/s<sup>2</sup>],
- $L_{wl}$  – długość na linii wodnej [m],
- $B_{wl}$  – szerokość na linii wodnej [m],
- $T$  – zanurzenie kadłuba [m],
- $C_p$  – współczynnik pełnotliwości walcowej [-].

Zbiór współczynników jest dość obszerny. Współczynniki zostały określone dla kombinacji wielkości, takich jak:

- Liczba Froude'a, [-]: 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 i 0,45;
- kąt natarcia fali [°]: 100, 120, 140, 160 i 180;
- promień bezwładności jako procent  $L_w$  [m<sup>4</sup>]: 0,20, 0,25 i 0,30;
- stosunek długości fali / długości statku [-]: 0,5, 0,6 .....4.0.

Do obliczeń przyjęto następujące wartości definiujące wielkość współczynników wielomianu:

- kąt natarcia fali – 180°;
- promień bezwładności – 0,25  $L_{WL}$ ;
- ponieważ wartość Liczby Froude'a dla jachtu badanego wynosi  $F_N = 0,373$ , to przyjęto wartości średnie dla wartości pomiędzy 0,35 i 0,40.

### 3.3. Metoda obliczeniowa zaawansowana

Jako metodę zaawansowaną przyjęto metodę obliczeniową, opartą na teorii paskowej (ang. *strip theory*) opracowaną przez Salvesena [Salvesen, Tuck i Faltinsen 1970]. Na podstawie opublikowanych wyników badań [Bentley 2016] można stwierdzić, że metoda pozwala na uzyskanie wartości obliczeń o dokładności około 10–15% w odniesieniu do przemieszczeń (nurzanie i kiwanie wzdłużne) i 20–30%

dla oporu dodatkowego. Do wyznaczenia oporu dodatkowego użyto metod: Havelocka [Havelock 1942] i Gerritsma-Beukelman II [Gerritsma i Beukelman 1972], przyjmując ich wartość średnią na potrzeby niniejszej rewizji.

Chociaż metoda paskowa obowiązuje tylko dla długich i smukłych kadłubów, eksperymenty wykazały, że może być również z powodzeniem stosowana dla statek, których stosunek długości do szerokości jest większy od 3 [Kornev 2012]. W przypadku obiektu badań wielkość ta wynosi 3.3.

### 3.4. Przypadki obliczeniowe

Parametry falowania regularnego dobrano tak, aby objąć wszystkie lub prawie wszystkie znaczące odpowiedzi badanego modelu, co dla stosunku długości fali do długości linii wodnej oznaczało następujący zakres wartości –  $\frac{\lambda}{L} \in \leq 0.65, 4.1 \geq$ . Jednocześnie, ze względu na wymogi badań eksperymentalnych, przyjęto taką wysokość fali regularnej, aby zachować kompromis pomiędzy koniecznością zachowania liniowego charakteru układu „fala – model” a potrzebą operowania na tyle dużymi wartościami mierzonymi, aby względny błąd pomiaru był możliwie mały. W skali modelu przyjęto wysokość fali równą  $\frac{\zeta_w}{2} \cong 0,025$  m, co po przeliczeniu na jednostkę pełnoskalową dało wartość 0,31 m. Przy tak ustalonych warunkach falowania wykonano obliczenia i pomiary dla prędkości postępowej jachtu rzeczywistego równej  $v_S = 8,0$  węzła, co było równoważne dla modelu wartości  $v_M = 1,614$  m/s.

## 4. WALIDACJA METOD OBLICZENIOWYCH

Dla walidacji metod obliczeniowych wykonano badania eksperymentalne w basenie holowniczym. Chociaż w chwili obecnej badania modelowe nadal zapewniają najbardziej niezawodne wyniki określania właściwości morskich, a także pozwalają na weryfikację poprawność projektowanego kształtu kadłuba [Michalski 2013], to ze względu na długotrwałość i koszty wytwarzania modelu fizycznego oraz ograniczoną dostępność do obiektów badawczych, w przypadku jachtów żaglowych wykonuje się je stosunkowo rzadko i wyłącznie dla już „finalnej” bryły kadłuba.

### 4.1. Warunki badań eksperymentalnych

Badaniom poddano geometrycznie podobny model jachtu, wykonany w skali 1:6,5. Badania przeprowadzono na basenie holowniczym Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Zakres badań obejmował pomiar dla warunków wody zafalowanej (fala czołowa regularna) wielkości, takich jak: opór od falowania morskiego, amplitudy ruchów: nurzań i kołysań wzdłużnych dla ustalonych w programie badań prędkości postępowej modelu i charakterystyki falowania.

## 4.2. Sposób przeprowadzenia pomiarów

Eksperyment wymagał użycia szeregu czujników do pomiaru następujących parametrów opisujących ruch modelu na fali:

- profil fali – sonda falowa umieszczona w obszarze pomiarowym dla holowanego modelu;
- opór – czujnik siły o zakresie  $\pm 200$  N;
- kołysania wzdłużne – czujnik kąta umieszczony na dnie modelu;
- nurzania – czujnik liniowy mierzący pośrednio nurzania w miejscu wzdłużnego położenia środka wyporu modelu;
- prędkość modelu – czujnik prędkości.

Model holowano za pomocą uchwytu, umożliwiającego swobodne ruchy pionowe i kołysania wzdłużne modelu. Uchwyt związano z modelem poprzez czujnik siły w miejscu wzdłużnego położenia środka wyporu modelu. Wyniki pomiarów w funkcji czasu rejestrowano na komputerze pomiarowym.

Model podczas badań przedstawiono na rysunku 2.



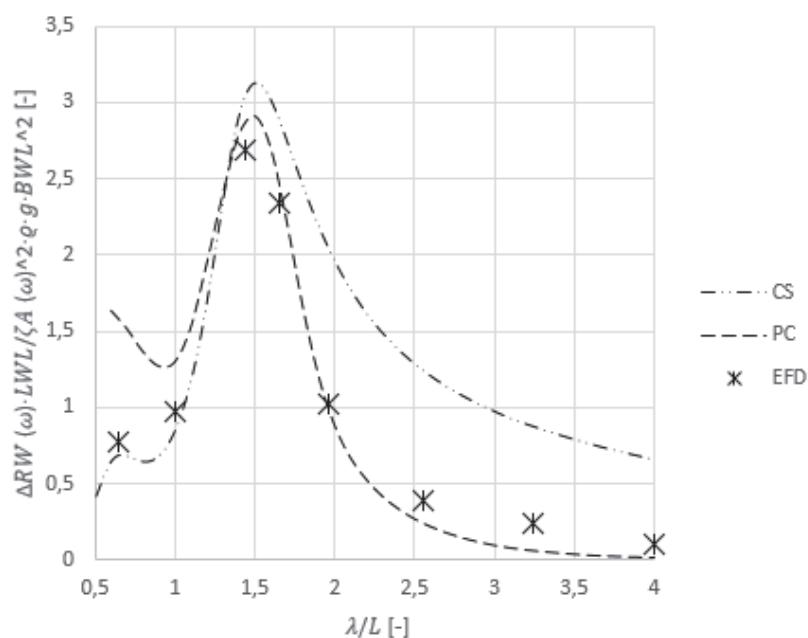
Rys. 2. Model w trakcie badań

## 5. WYNIKI BADAŃ

W obliczeniach oporu dodatkowego, czyli oporu wynikającego z oddziaływania fal morskich, użyto metody łączonej średniej. W pierwszym kroku wykorzystano metodę Havelocka i Gerritsma-Beukelman II, następnie obliczono ich wartość średnią, który to wynik przyjęto do dalszej analizy porównawczej. Podobny sposób zaproponowano w publikacji, w przypadku, gdy stosowane metody nie są bezpośrednio wskazane dla danego typu obiektów [Karczewski i Kozak 2018].



Porównanie wyników numerycznych z eksperymentalnymi pokazano graficznie na rysunku 3 oraz tabelarycznie jako średni błąd względny eksperymentalnej wartości oporu w tabeli 1. Dla obu metod w zakresie długości fali równej długości na wodnicy i nie dłuższej niż 50% tej wartości, odchyłki pomiędzy eksperymentem fizycznym a metodami obliczeniowymi nie przekraczają 20%. Charakter przebiegu charakterystyk funkcji przenoszenia jest również geometrycznie zbliżony, co oznacza występowanie maksimum dla podobnych wartości częstotliwości falowania, około 1,8 [rad/s]. Zbieżność wyników pomiędzy metodą uproszczoną (PC) a badaniami modelowymi (EFD) wskazuje na możliwości wykorzystania jej w procesie projektowym bez użycia skomplikowanych narzędzi numerycznych.



Rys. 3. Bezwymiarowe charakterystyki amplitudowe oporu dodatkowego

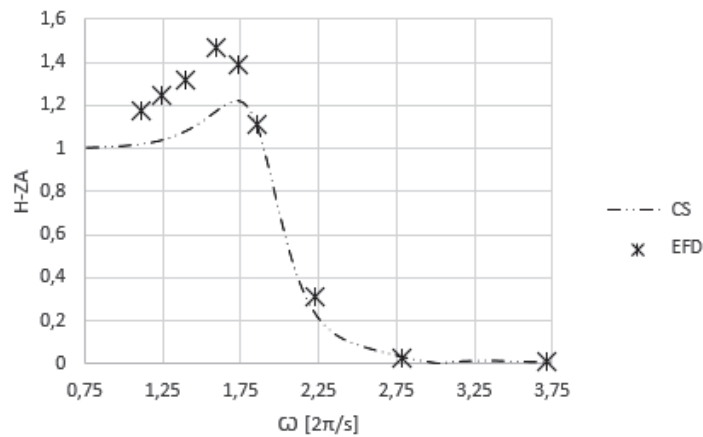
Tabela 1

Błąd względny pomiędzy wynikami obliczeniowymi i eksperymentem

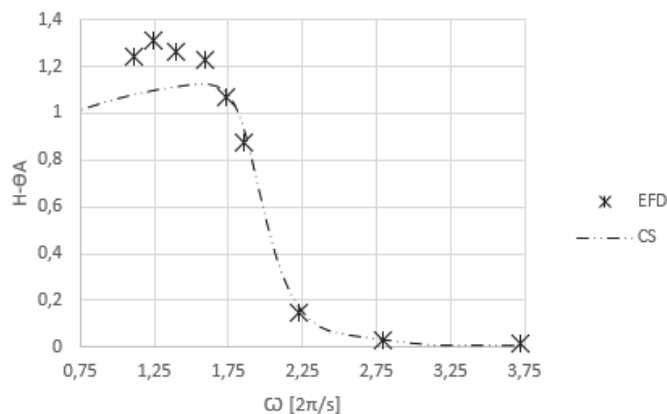
| $\lambda/L$<br>[-] | EFD vs. PC | EFD vs. CS |
|--------------------|------------|------------|
| 0,64               | 85%        | 16%        |
| 1,00               | 26%        | 16%        |
| 1,44               | 1%         | 7%         |
| 1,65               | 10%        | 15%        |
| 1,96               | 18%        | 81%        |
| 2,56               | 46%        | 219%       |



Na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano porównanie wyników charakterystyk amplitudowych nurzań i kiwań wzdłużnych, wyznaczonych z symulacji komputerowych oraz z badań eksperymentalnych, wykonanych w basenie modelowym. Wyniki ruchów kadłuba przedstawiono w formie bezwymiarowych funkcji przeniesienia (RAO). Niezależnie od metody charakterystyki mają zbliżony przebieg. Istnieje niewielkie przesunięcie w położeniu maksimum funkcji, co może wynikać z braku modelowania występujących zjawisk nieliniowych. Względne błędy pomiędzy wynikami numerycznymi i eksperymentalnymi w przedziale częstotliwości falowej 1,1–2,75 [rad/s], co odpowiada zakresowi stosunku długości fali do długości na linii wodnej jachtu  $\frac{\lambda}{L} \in \leq 0.65, 4.0 \geq$ , nie odbiegają niewiele od spodziewanych wartości i oscylują w wartościach do 20%. Wartości maksymalne występują w przedziale od 1,7 do 1,8 [rad/s], co odpowiada długości fali o 50% większej niż długość na linii wodnej jachtu.



Rys. 4. Bezwymiarowe charakterystyki amplitudowe ruchów w pionie – nurzań



Rys. 5. Bezwymiarowe charakterystyki amplitudowe przemieszczeń kątowych – kołysań

Szczegółowe procentowe różnice, w postaci błędu względnego, pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i symulacjami numerycznymi umieszczono w tabeli 2.

**Tabela 2**

Błąd względny pomiędzy wynikami obliczeniowymi i eksperymentem

| $\omega$<br>[ $2\pi/s$ ] | H-ZA<br>EFD vs. CS | H- $\Phi$ A<br>EFD vs. CS |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|
| 3,72                     | 27,2%              | 55,3%                     |
| 2,79                     | 34,8%              | 3,1%                      |
| 2,23                     | 18,0%              | 23,1%                     |
| 1,86                     | 1,5%               | 9,0%                      |
| 1,74                     | 12,4%              | 3,6%                      |
| 1,59                     | 20,5%              | 8,1%                      |
| 1,39                     | 18,4%              | 11,7%                     |
| 1,24                     | 17,7%              | 16,9%                     |
| 1,12                     | 13,4%              | 13,1%                     |

## PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę porównawczą wybranych dostępnych metod określenia charakterystyk przydatnych do predykcji właściwości morskich modelowego jachtu żaglowego. Przyjęto, że metodami walidowanymi są metody obliczeniowe, które mogą być wykorzystywane w procesie projektowania kształtu kadłuba, dla jego optymalizacji lub opracowywania wariantowego. Takie podejście pozwala na sprawdzenie wybranych właściwości projektowanej bryły w środowisku cyfrowym, bez konieczności wykonywania modelu fizycznego kadłuba. Obniża to koszty całego procesu, skraca jego czas i umożliwia automatyzację procesu przez jego algorytmizację [Karczewski i Kozak 2017].

Metoda uproszczona, opisana przez wielomian regresyjny, oraz symulacje komputerowe na bazie metody paskowej zostały sprawdzone z wykorzystaniem niezależnych wyników uzyskanych w badaniach eksperymentalnych w basenie holowniczym. Uzyskano dobrą zbieżność wyników analizowanych właściwości morskich, co potwierdziło poprawność modeli obliczeniowych analizowanego jachtu oraz potencjalną przydatność wyselekcjonowanych metod do użycia w procesie projektowym.

Należy zwrócić uwagę, że porównanie ograniczono wyłącznie do charakterystyk amplitudowych dla falowania regularnego. Znając jednak liniowy charakter właściwości morskich, stanowią one fundament dla prognoz krótko- i długoterminowych zachowania jachtu poruszającego się na danym akwenie żegludowym. Takie podejście pozwala również na jakościową ocenę projektowanego kształtu kadłuba, co stanowi dużą zaletę podczas procesu jego tworzenia, bez względu na zmieniające się w czasie co do wartości jego charakterystyki

techniczne. W takim przypadku projekt potrzebuje narzędzi wspomagających ocenę opracowywanego rozwiązania nie zawsze w sposób bezpośredni i bezwzględny, a raczej poprzez wskazanie skłonności rozwoju danej cechy.

## PODZIĘKOWANIA

Badanie przeprowadzono w ramach umowy z Centrum Badawczo-Rozwojowym Delphia Yachts w Olecku, które jest właścicielem projektu badanego jachtu.

Projekt jest częścią pracy magisterskiej opracowywanej na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

Artykuł powstał na podstawie wystąpienia podczas IV Konferencji „Osiągnięcia Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych” – STUKNUT 2018, zorganizowanej przez Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

## LITERATURA

1. Bentley, 2016, *User Manual MAXSURF Motions*, Bentley System.
2. Gerritsma J., Beukelman W., 1972, *Analysis of the resistance increase in waves of a fat cargo ship*, ISP, vol. 19, no. 2017.
3. Havelock T., 1942, *Drifting force on a ship among waves*, Philosophical Magazine, no. 33.
4. Homma N., 2003, *Added resistance due to waves*, Shiphidromechanics Laboratory, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
5. Huetz, L., Alessandrini, B., 2011, *Systematic study of the hydrodynamic forces on a sailing yacht hull using parametric design and CFD*, Rotterdam, Netherlands.
6. Karczewski A., Kozak J., 2017, *Variants method approach to the preliminary ship design*, Mechanik, nr 12, s. 1196–1198.
7. Karczewski A., Kozak J., 2018, *Comparison of selected parametric methods for prediction of inland waterways ship hull resistance in towing tank test*, Polish Maritime Research, SO1, s. 63–67.
8. Keuning J., Vermeulen K., ten Have H., 2006, *An approximation method for the added resistance in waves*, MDY06, Madrid, Spain.
9. Kijewski J., 2017, *Delphia zapowiada nowe jachty*, <https://www.jachting.com>.
10. Kornev N., 2012, *Ship dynamics in waves (strip theory II)*, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, Rostock, Germany.
11. Lloyd A.R.J.M., 1989, *Lloyd, Seakeeping – ship behaviour in rough weather*, A R J M Lloyds, 26 Sprithead Avenue, Gosport, United Kingdom.
12. Michalski J., 2013, *Podstawy teorii projektowania okrętów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
13. Reumer J., 1997, *MSc Thesis: A design of a polynomial expression for the RAO of added resistance of a sailing yacht in waves*, Shiphidromechanics Laboratory, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

14. Salvesen N., Tuck O., Faltinsen O., 1970, *Ship motions and sea loads*, Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, no. 78, s. 250–287.
15. Stasiak J., 2003, *Krótkoterminowe prognozy ruchów i oporu statku poruszającego się na czołowych falowaniach nieregularnych*, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.

## **THE ANALYSIS OF THE SELECTED CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHODS OF DETERMINING THE AMPLITUDE OPERATORS OF THE YACHT IN REGULAR WAVES**

### Summary

*This paper presents the results of a comparison analysis for seakeeping performance in regular waves obtained by three methods. Two of them were based on a computational approach, the third was based on an experiment carried out in a model pool. The usefulness of empirical formulas developed on the basis of the Delft yacht hulls has been revised. Computer simulations were performed using a numerical model according to strip theory, and model tests were performed to validate both methods.*

*For selected wave characteristics, heave and pitch motions was compared. The added resistance in waves was also examined.*

**Keywords:** *sailing yacht, added resistance, approximate methods, towing tank, seakeeping.*