

Jerzy Merkisz  
Politechnika Poznańska

Leszek Piaseczny  
Akademia Marynarki Wojennej

## STATYCZNE WARUNKI UŻYTKOWANIA OKRĘTOWYCH SILNIKÓW NAPĘDU GŁÓWNEGO

**Streszczenie:** W artykule opisano statyczne warunki pracy okrętowych silników spalinowych napędu głównego oraz podano ich charakterystyki oporowe i charakterystyki śrub napędowych. Uwzględniono m.in. następujące warunki użytkowania jednostek pływających: pływanie na wodzie o ograniczonej głębokości, pływanie w sztormie oraz pływanie przy zmienionym zanurzeniu (załadowaniu) kadłuba. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań, dotyczące warunków pracy okrętowego układu napędowego.

**Słowa kluczowe:** silniki okrętowe, warunki pracy, układ napędowy

### 1. WARUNKI PRACY OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Podstawową charakterystyką opisującą warunki pracy silnika głównego w okrętowym układzie napędowym jest charakterystyka oporowa oraz charakterystyka śrub napędowych jednostki pływającej. Stopień zgodności z rzeczywistością zależy więc od dokładności odwzorowania rzeczywistego obiektu w modelu oraz warunków realizowanych pomiarów i obliczeń. Najczęściej wykorzystywane są opracowane metody obliczeniowe charakterystyk oporowych na podstawie dostępnych ogólnych danych określonej jednostki pływającej.

W pierwszej z wymienionych zależności całkowity opór kadłuba na wodzie głębokiej jest odniesiony do wyporności jednostki pływającej, wyrażonej w tonach siły, czyli odniesionej do wyporu jednostki. Zależność tę opisuje wzór w zapisie autorskim

$$10^3 \frac{R}{D} = 13,2(48 \cdot Fn_v^2 - 29 \cdot Fn_v + 5,9) \frac{\delta}{\frac{L}{B} \left(\frac{B}{T}\right)^{0,2}} \quad (1)$$

po skorygowaniu którego otrzymuje się zmodyfikowaną postać wyrażenia do obliczenia oporu okrętu na wodzie głębokiej w obowiązujących jednostkach siły

$$R = 0,0132 \cdot 9,81 \cdot \rho \cdot L \cdot B \cdot T \cdot \delta (48 \cdot Fn_v^2 - 29 \cdot Fn_v + 5,9) \frac{\delta}{\frac{L}{B} \left( \frac{B}{T} \right)^{0,2}} \quad (2)$$

gdzie:  $R$  [kN] – opór,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – gęstość wody morskiej ( $\rho = 1026$  kg/m<sup>3</sup>),  $Fn_v$  – liczba Frouda odniesiona do objętości podwodzia  $Fn_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}} = \frac{v}{\sqrt{g^3 L \cdot B \cdot T \cdot \delta}}$ ,  $V$  [m<sup>3</sup>] –

objętość podwodzia,  $L$ ,  $B$ ,  $T$  [m] – wymiary kadłuba okrętu,  $\delta$  – współczynnik pełnotliwości kadłuba  $\delta = V / (L \cdot B \cdot T)$  stosunek objętości podwodnej części kadłuba do objętości bryły opisanego na podwodziu prostopadłościanu,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] – przyspieszenie ziemskie.

Stosowanie wzoru ograniczono jednak do następujących zakresów zmian parametrów kadłuba okrętu:  $Fn_v = 0,37-0,77$ ;  $\delta = 0,70-0,86$ ;  $L/B = 5,0-9,5$ ;  $B/T = 3,3-13$ .

Ze względu na ograniczenia w stosowaniu opisanej metody, w obliczeniach oporu całkowitego okrętu można wykorzystać znaną metodę opracowaną przez Leningradzkie Biuro Projektów. W metodzie tej opór całkowity kadłuba okrętu opisuje zależność

$$R = g \left\{ 0,17 \cdot \Omega \cdot v^{1,825} + 1,45 \left( 24 - \frac{L}{B} \right) \delta^2 \frac{D}{L^2} v^4 \right\} \quad (3)$$

gdzie:  $v$  [m/s] – prędkość okrętu,  $B$ ,  $L$  [m] – szerokość kadłuba i długość wodnicy konstrukcyjnej,  $D$  [t] – wyporność okrętu,  $\Omega$  [m<sup>2</sup>] – pole powierzchni zwilżonej kadłuba.

Na podstawie zależności (2) lub (3) można więc wyznaczyć charakterystykę oporową określonego okrętu podczas pływania na wodzie nieograniczonej (głębokiej). Wyznaczona w ten sposób charakterystyka oporowa pozwala na wyznaczenie charakterystyki mocy holowania jednostki oraz zapotrzebowanej mocy użytecznej silnika napędowego

$$P_h = R \cdot v \quad (4)$$

$$P_e = \frac{R \cdot v}{\xi_o \cdot \eta_{LW} \cdot \eta_r} \quad (5)$$

gdzie:  $P_h$  [kW] – moc holowania,  $P_e$  [kW] – moc użyteczna silnika głównego (wszystkich silników głównych),  $R$  [kN] – opór całkowity okrętu na wodzie głębokiej,  $\xi_o$  [–] – sprawność napędowa układu  $\xi_o = \eta_p \cdot \xi_r \cdot \xi_k$ ,  $\eta_p$  [–] – sprawność pędnika swobodnego (śruby napędowej swobodnej),  $\xi_r$  [–] – sprawność rotacyjna uwzględniająca zmiany prędkości i kierunku napływu wody,  $\xi_k$  [–] – sprawność kadłuba, a ściślej współczynnik oddziaływania kadłuba na pracę śruby,  $\xi_k = (1 - t) / (1 - w)$ ,  $t$  [–] – współczynnik ssania śruby,  $w$  [–] – współczynnik strumienia nadążającego,  $\eta_{LW}$  [–] – sprawność linii wałów,  $\eta_r$  [–] – sprawność przekładni redukcyjnej.

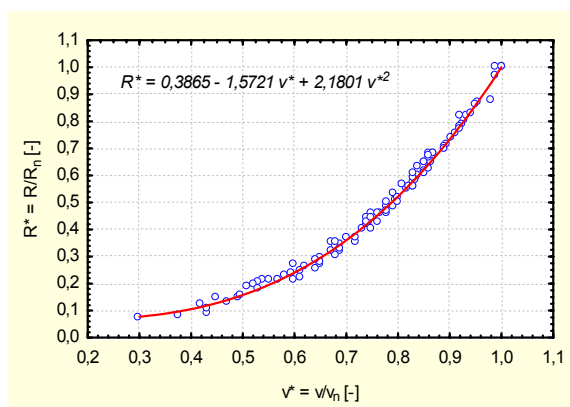
Przyjmując z literatury [3] średnie wartości współczynników dla układów napędowych wyposażonych w tłokowe silniki spalinowe wolnoobrotowe ( $\xi_0 = 0,65$ ,  $\eta_{LW} = 0,985$ ,  $\xi_k = 1$ ) wzór do przybliżonego obliczenia użytecznej mocy zapotrzebowanej uproszczy się

$$P_{e_w} \cong 1,56 \cdot R \cdot v \quad (6)$$

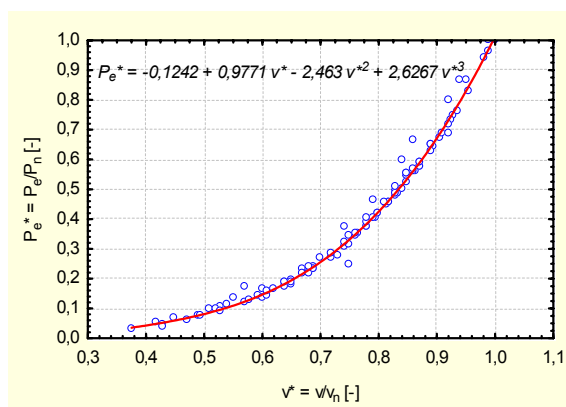
natomiast w przypadku układów napędowych z tłokowymi silnikami spalinowymi szybkoobrotowymi ( $\xi_0 = 0,55$ ,  $\eta_{LW} = 0,985$ ,  $\eta_r = 0,97$ ,  $\xi_k = 1$ ) zależność (6) do postaci

$$P_{e_s} \cong 1,9 \cdot R \cdot v \quad (7)$$

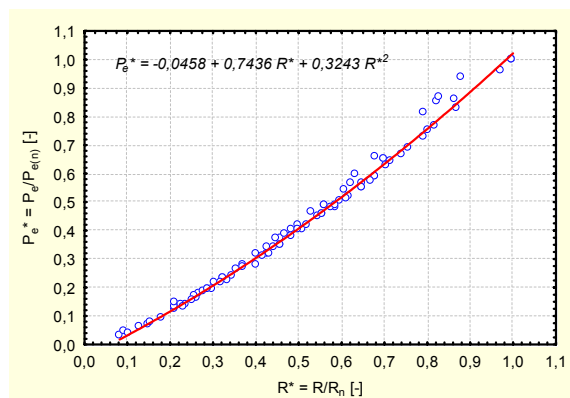
Na rysunkach 1–4 zamieszczono aproksymowane rzeczywiste względne charakterystyki okrętowego układu ruchowego o kadłubie wypornościowym dla standardowych (nominalnych) warunków użytkowania jednostki pływającej (stan morza do 3<sup>o</sup>B, nieograniczony akwen pływania, stan załadunku na poziomie nominalnym).



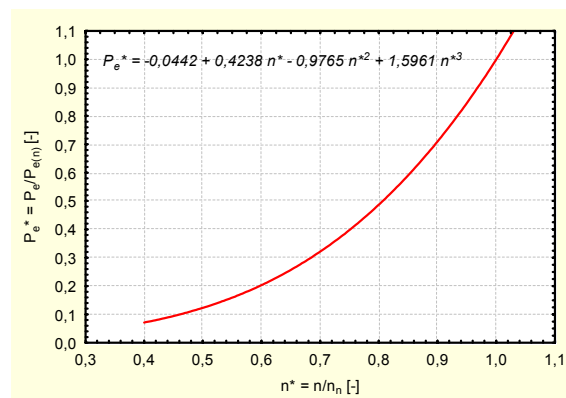
Rys. 1. Standardowa uśredniona charakterystyka oporowa



Rys. 2. Standardowa uśredniona charakterystyka mocy okrętu o kadłubie wypornościowym



Rys. 3. Standardowa uśredniona charakterystyka



Rys. 4. Standardowa uśredniona charakterystyka śrubowa obciążeniowa okrętu o kadłubie wypornościowym

## 2. RZECZYWISTE STATYCZNE WARUNKI PRACY OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

### 2.1. Warunki pracy okrętowego układu napędowego

Z danych literaturowych oraz doświadczeń własnych w eksploatacji siłowni okrętowych wynika, że w opisach modelu ruchu jednostek pływających należy uwzględnić zmiany obciążenia silników napędu głównego przede wszystkim podczas następujących warunków użytkowania jednostek pływających: pływania na wodzie o ograniczonej głębokości, pływania w sztormie, pływania przy silnych prądach wodnych, pływania przy zmienionym zanurzeniu (załadowaniu) kadłuba oraz pływania przy zmienionej chropowatości kadłuba.

### 2.2. Ograniczona głębokość wody

W warunkach użytkowania okrętu rozróżnia się żeglugę na drodze wodnej nieograniczonej, której wpływ na zmiany oporu kadłuba jest pomijalnie mały oraz na drodze wodnej ograniczonej, na której wpływ jej głębokości na opory ruchu okrętu jest znaczący, a sam okręt wywołuje przepływ oddziałujący na dno toru wodnego. Podawane są różne definicje (określenia) wody nieograniczonej. Na uwagę zasługuje podział według [5], zgodnie z którym woda nieograniczona pod względem głębokości powinna spełniać warunek, że  $h > 20 \cdot T$  (gdzie:  $h$  – głębokość wody;  $T$  – maksymalne zanurzenie okrętu).

Zasadnicze zmiany dotyczą jednak oporu falowego, które są wynikiem zmienionej charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej, gdzie wzrost prędkości okrętu powoduje wzrost długości fal w układzie fal poprzecznych. Opór falowy osiąga maksymalną wartość przy prędkości krytycznej. Po przekroczeniu prędkości krytycznej kadłub okrętu generuje wtórny układ fal, składający się z dwóch pęków fal skośnych. Prędkość krytyczna okrętu jest równa prędkości krytycznej rozchodzenia się generowanej fali na wodzie płytkiej

$$v_{kr} = \sqrt{g \cdot h} \quad (8)$$

Z przeprowadzonego przez autora [6] opisu matematycznego i analizy charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej wynika, że zasadniczy wpływ na zmianę kształtu generowanego układu falowego ma malejąca prędkość  $v$ , z jaką przemieszcza się energia zawarta w falach przy przejściu z wody głębokiej na wodę płytką o głębokości  $h$

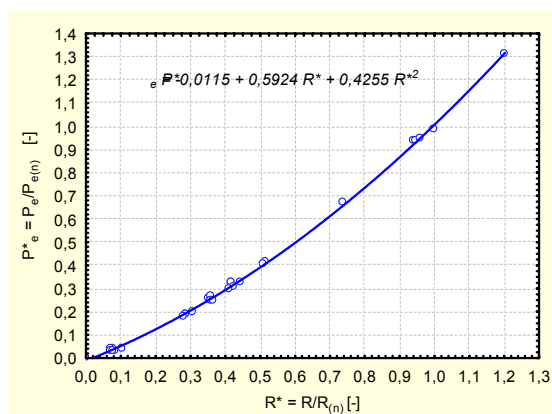
$$v_h = v \cdot \sqrt{\operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (9)$$

gdzie:  $v_h$  [m/s] – prędkość fali na wodzie płytkiej o głębokości  $h$ ,  $v$  [m/s] – prędkość fali na wodzie głębokiej,  $\lambda$  [m] – długość fali.

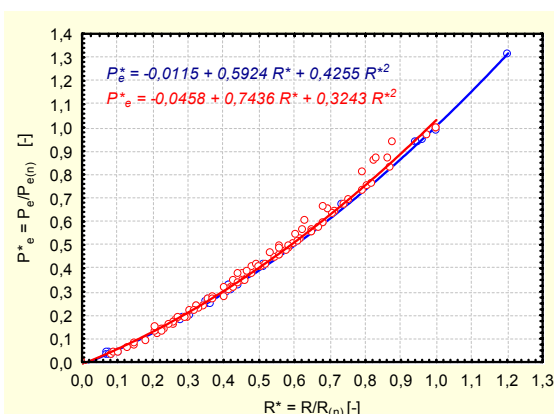
Prędkość rozchodzenia się fal na wodzie głębokiej jest równa prędkości okrętu, lecz po wplynięciu na wodę płytką prawidłowość ta zostaje zakłócona, ponieważ długość fal rośnie, a ich prędkość maleje. Prędkość krytyczna okrętu na wodzie płytkiej o ustalonej głębokości przy tym jest równa maksymalnej prędkości z jaką może przemieszczać się fala odosobniona na wodzie płytkiej o takiej samej głębokości. Przy prędkości pływania mniejszej od  $v_h = 0,4 \cdot v_{kr}$  opływ kadłuba praktycznie nie różni się od opływu na wodzie głębokiej i można przyjąć, że wartość oporu danego okrętu na wodzie płytkiej przy tych prędkościach nie różni się istotnie od oporu na wodzie głębokiej. Przy prędkościach pływania  $0,4 \cdot v_{kr} < v_h \leq 0,75 \cdot v_{kr}$  charakterystyka układu falowego ulega znacznej zmianie, to znaczy zwiększa się kąt propagacji fal skośnych, rosną amplitudy fal skośnych i fal poprzecznych, a opór wzrasta w porównaniu z oporem na wodzie głębokiej. Przy prędkościach  $0,75 \cdot v_{kr} < v_h \leq v_{kr}$  prawie cały układ falowy koncentruje się w dwóch spiętrzonych falach poprzecznych, mających charakter fal odosobnionych, generowanych w pobliżu rufy i dziobu kadłuba. W tym zakresie prędkości opór okrętu osiąga maksymalną wartość. Powyższe dane wskazują, że do wyznaczenia oporu okrętu na akwenach o ograniczonych głębokościach można zastosować sposób polegający na porównaniu wartości oporu na wodzie głębokiej przy określonej prędkości pływania  $v$  z oporem na wodzie płytkiej przy innej ekwiwalentnej prędkości ruchu  $v_h$ :

$$v_h = v \cdot \sqrt{\operatorname{tgh} \frac{g \cdot h}{v^2}} \quad (10)$$

Zatem do wyznaczenia oporu kadłuba określonego okrętu na wodzie płytkiej konieczna jest znajomość jego standardowej charakterystyki oporowej. Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono aproksymowane rzeczywiste względne charakterystyki okrętowego układu ruchowego o kadłubie wypornościowym podczas pływania na wodzie ograniczonej.



Rys. 5. Charakterystyka obciążeniowa układu ruchowego z kadłubem wypornościowym



Rys. 6. Porównanie charakterystyki obciążeniowej w normalnych (standardowych) i pogorszonych warunkach zewnętrznych

Zamieszczone wykresy świadczą, że spośród wszystkich znanych charakterystyk okrętowych układów ruchowych, charakterystyka obciążeniowa typu  $Pe = f(R)$  nie ulega zmianie w następstwie zmiany zewnętrznych warunków pływania okrętu. Wykazana

właściwość wyżej rozważanej charakterystyki obciążeniowej wskazuje na możliwość znacznego uproszczenia procedur obliczeniowych podczas wyznaczania aktualnej wartości mocy silników napędu głównego. Powinien być jednak spełniony warunek znajomości wartości bezwzględnej mocy co najmniej w jednym punkcie aktualnej charakterystyki śrubowej silnika.

### 2.3. Pływanie w sztormie

Można przyjąć, że zmniejszenie prędkości okrętu podczas pływania w warunkach sztormowych jest następstwem wzrostu oporu aerodynamicznego i hydrodynamicznego, przyrostu oporu spowodowanego znosem i intensywną pracą urządzeń sterowych, zmniejszonej sprawności śrub napędowych oraz w warunkach ich wynurzania oraz zmieniającego się kierunku ruchu okrętu. Zmniejszenie prędkości przez załogę okrętową może mieć miejsce z powodu zjawisk występujących podczas sztormu, m.in.: zalewania pokładu, dużego obciążenia dynamicznego kadłuba, wysokich wartości ciśnień w dziobowej części dna okrętu przy uderzeniu o wodę podczas kołysania podłużnego oraz intensywnego kołysania poprzecznego.

Najwyższe wartości dodatkowego oporu od wiatru występują, kiedy kąt pomiędzy kierunkiem wiatru i kursem okrętu wynosi 30–40°. Wówczas może on przekraczać nawet o 50% wartość oporu występującego podczas pływania pod wiatr (przy kącie 0°). O wartości oporu dodatkowego od wiatru decyduje także sposób zabudowy i kształt nadbudówek. Korzystniejsze pod tym względem są nadbudówki o zabudowie ciągłej i opływowej.

Opór dodatkowy od wiatru można obliczyć z zależności

$$R_p = c_o \cdot \rho \cdot A_p \cdot \cos \varphi (v_w^2 + v^2 + 2v_w \cdot v \cos \varphi) \quad (11)$$

gdzie:  $R_p$  [N] – dodatkowy opór od wiatru,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – gęstość powietrza  $\rho = 1,2928$ ,  $A_p$  [m<sup>2</sup>] – pole powierzchni poprzecznej rzutu nadwodnej części kadłuba,  $\varphi$  [°] – kąt między kierunkiem wiatru i kursem okrętu,  $v$  [m/s] – prędkość okrętu,  $v_w$  [m/s] – prędkość wiatru,  $c_o$  [-] – współczynnik oporu powietrza.

Dodatkowy opór od falowania wody jest efektem dodatkowego kołysania wzdłużnego, poprzecznego i pionowego okrętu. Powodują one wzrost oporu, który jest tym większy, im większa jest wysokość fali i większa prędkość okrętu. Pomiędzy prędkością wiatru i wysokością fali przy tym występuje zależność

$$v_w = 8 \cdot \sqrt{h_f} \quad (12)$$

gdzie:  $v_w$  [w] – prędkość wiatru w węzłach – 1 w  $\approx 0,514$  m/s,  $h_f$  [ft] – wysokość fali w stopach – 1 ft = 0,3048 m.

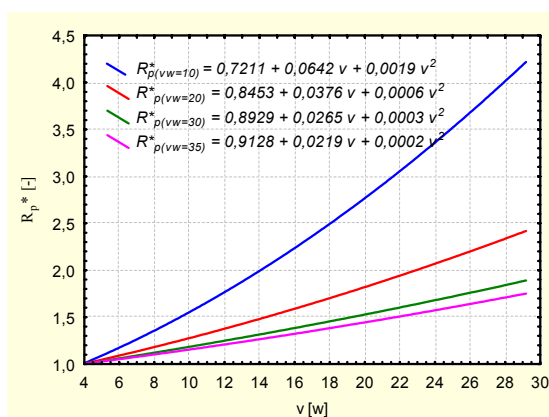
Dodatkowy opór od fali określany jest zwykle dla warunków pływania w sztormie, kiedy przyjmuje największe wartości. Metody rachunkowe dotyczą więc przede wszystkim wyznaczania oporu okrętu na fali przeciwnej do kierunku pływania. W obliczeniach przybliżonych przyjmuje się, że fala nieregularna jest sumą fal regularnych sinusoidalnych oraz średni opór okrętu na fali nieregularnej jest sumą oporów na fali regularnej.

Przybliżony dodatkowy opór od falowania wody podczas sztormu można wyznaczyć w oparciu o metody empiryczne, spośród których na uwagę zasługuje wzór Dawidsona

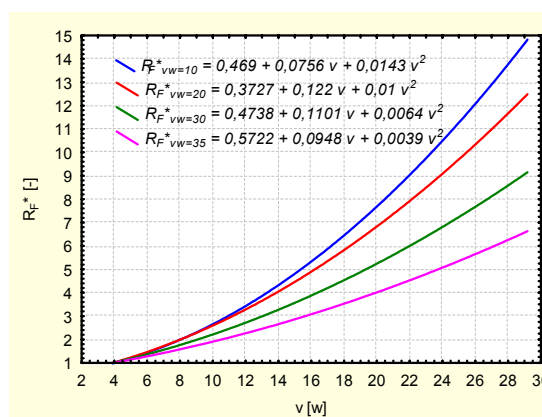
$$R_F = \frac{\rho(v + v_f)^2}{2} \cdot \frac{B \cdot h_f}{\pi} (1 - \cos \psi_d) \quad (13)$$

gdzie:  $R_F$  [N] – dodatkowy opór od fali,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – gęstość wody,  $v_f$  [m/s] – prędkość rozchodzenia się fali,  $\lambda$  [m] – długość fali,  $B$  [m] – szerokość okrętu na linii wodnej,  $\psi_d$  [°] – połowa kąta zaostrenia dziobu kadłuba na linii wodnicy.

Wyznaczenie zmienionych podczas sztormu rozkładów wartości oporu pływania oraz mocy silników napędu głównego polega na dodaniu do charakterystyk standardowych przedstawionych na rys. 1 i rys. 2 dodatkowych rozkładów wartości oporów i mocy od wiatru oraz falowania wody, które zamieszczono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Względny przyrost dodatkowego oporu od falowania w zależności od prędkości wiatru



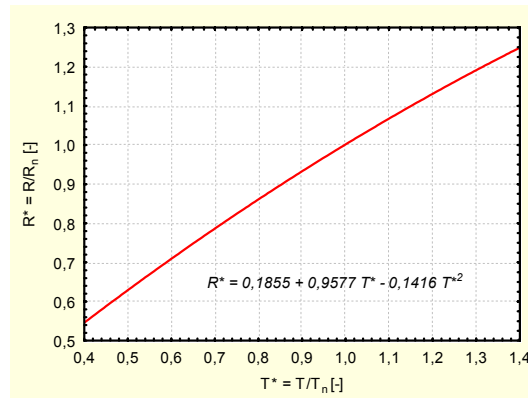
Rys. 8. Względny przyrost dodatkowego oporu od powietrza w zależności od prędkości wiatru i prędkości pływania

#### 2.4. Pływanie po zmianie zanurzenia

Zmiana zanurzenia kadłuba powodowana jest przede wszystkim stanem załadowania i w mniejszym stopniu stanem zasolenia (gęstością) wody akwenu pływania. Wpływa na zmianę wartości powierzchni zwilżonej i opór okrętu. Ze znanych wzorów wynika, że dla różnych stanów załadowania (wyporności) kadłuba, przy określonej (niezmienionej) prędkości pływania, opór okrętu  $R$  zmienia się z wypornością  $D$  zgodnie z zależnością

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

Na rysunku 9 zamieszczono wykres oraz aproksymowaną zależność do obliczenia wartości względnej oporu  $R^*$  kadłuba a w zależności od zmiany wyporności (zanurzenia) jednostki pływającej.



Rys. 9. Zależność względnego oporu od zmiany zanurzenia kadłuba jednostki pływającej

Zmiana oporu, a stąd i prędkości pływania przy określonej mocy zapotrzebowanej może być także następstwem występujących powszechnie zmian chropowatości poszycia kadłuba oraz elementów jego podwodnego wyposażenia. Zmiany te spowodowane są głównie przez porastanie organizmami morskimi, korozję, kawitację poszycia oraz erozję malarskiej powłoki ochronno-konserwacyjnej.

### Bibliografia

1. Dudziak J.: Teoria okrętu. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988.
2. Pawłowski M.: Nieliniowy model kołysań statku na fali nieregularnej. Raport Techniczny Nr 33/99, PRS, Gdańsk 1999.
3. Wojnowski W.: Okrętowe siłownie okrętowe. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Wydawnictwo Morski Instytut Rybacki, Gdańsk 1991.
4. Michalski J.P.: Metody wyznaczania oporu i mas uogólnionych kadłuba przydatne w
5. projektowaniu wstępnym statków dwukadłubowych o małej wodnicy pływania. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002.
6. Kulezyk J., Winter J.: Śródlądowy transport wodny. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
7. Michalski J.P.: Metody przydatne do wymaganego komputerem projektowania wstępnego statków śródlądowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
8. Wroblewska L.N., Sirotina G.N.: Opriedielenije moszcznosti energiczeskoj ustanowki w naczalnoj stadii projektowanija gruzowych sudow wnutriennego i smieszanogo pławanija. Trudy GIIWT, nr 144, 1975.

### STEADY-STATE OPERATING CONDITIONS OF MARINE MASTER ENGINES

**Abstract:** The paper presents static operating conditions of marine master engines along with their hull resistance characteristics including the characteristics of the propellers. The following vessel conditions have been considered: operating in waters of limited depth, operating under storm conditions and operating under variable vessel draught. Example results of the investigations have been shown in relation to the operation of the vessel's propulsion system.

**Keywords:** marine engines, operating conditions, propulsion system