

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Tadeusz Szelangiewicz, Katarzyna Żelazny

**Prognozowanie charakterystyk napędowych statku
ze śrubą stałą podczas pływania
w zmiennych warunkach pogodowych**

Słowa kluczowe: charakterystyki napędowe statku, praca napędu w zmiennych warunkach pogodowych

Przedstawiono algorytm umożliwiający numeryczne obliczanie charakterystyk napędowych statku. Charakterystyki te uzupełniono o wykresy całkowitego oporu w określonych warunkach pogodowych. Podano różne możliwości wyboru punktu pracy układu napędowego w zależności od przyjętych kryteriów.

Prediction of Propulsion Performance of a Ship with Fixed-Pitch Propeller in Variable Weather Conditions

Key words: ship propulsion characteristics, propulsion operation in variable weather conditions

The article presents an algorithm for the numerical calculation of ship propulsion characteristics. The propulsion characteristics were completed with total resistance charts for given weather conditions. Alternative choices of the propulsion working point depending on assumed criteria were discussed.

Wstęp

W projektowaniu statku jak i w przyszłej jego eksploatacji duże znaczenie ma znajomość charakterystyk napędowych. Ciągła dążność do minimalizacji zużycia paliwa, a tym samym kosztów eksploatacji wymaga z jednej strony stosowania coraz ekonomiczniejszych silników napędowych a z drugiej racjonalnego ich wykorzystywania w trakcie eksploatacji statku, a szczególnie w zmiennych warunkach pogodowych. Zmiany warunków pogodowych podczas eksploatacji statku są bardzo duże – od pogody bezwietrznej (co zdarza się dosyć rzadko) do stanów sztormowych z wysokimi falami i dużymi prędkościami wiatru. Wybór, w takich zmiennych warunkach pogodowych, właściwego punktu pracy silnika, szczególnie przy optymalizacji trasy żeglugi, ma duże znaczenie. W celu ułatwienia w podejmowaniu racjonalnych decyzji o nastawach paliwowych, które to nastawy mają wpływ na punkt pracy układu napędowego oraz na parametry eksploatacyjne statku, celowa jest znajomość charakterystyk napędowych zawierających także informacje o parametrach pogodowych, w jakich może być eksploatowany statek.

1. Charakterystyki napędowe statku

Charakterystyki napędowe statku są to krzywe mocy napędu, naporu i momentu na stożku śruby napędowej, zużycia paliwa i ewentualnie osiągniętej prędkości statku dla danej charakterystyki oporowej. Charakterystyki te są przedstawiane w funkcji obrotów śruby/silnika lub w funkcji prędkości statku, na polu pracy silnika napędowego. Charakterystyki napędowe, publikowane w literaturze, wykonuje się najczęściej na podstawie:

- wyników badań modelowych śrub swobodnych lub śrub za kadłubem statku,
- wyników pomiarów przeprowadzonych na statku,
- wyników pomiarów przeprowadzonych na statku z jednoczesnym wykorzystaniem charakterystyk śrub swobodnych otrzymanych na drodze badań modelowych lub określonych numerycznie [1, 2].

Stosunkowo mało jest charakterystyk napędowych otrzymanych na drodze obliczeń numerycznych, algorytm przydatny do obliczeń tych charakterystyk został zamieszczony w pracy [3].

Charakterystyki napędowe mają służyć do kontroli stanu obciążenia układu napędowego statku i wyboru ekonomicznie uzasadnionych parametrów pracy tego układu napędowego, w zmiennych warunkach pogodowych. Stąd

zasadniczą częścią tych charakterystyk są krzywe mocy dla warunków projektowych (tzw. charakterystyka śrubowa) i dla warunków, w których występuje wzrost oporu od wiatru i fali. Dodatkowe charakterystyki mocy są obliczane przy założeniu wzrostu oporu o określoną wartość np. 50, 100, 150% [2]. Tak przedstawione charakterystyki mocy nie dają możliwości optymalnego wyboru parametrów pracy układu napędowego, ponieważ nie wiadomo od jakich wartości parametrów pogodowych jest odniesiony – jeżeli jest wzrost oporu, to najczęściej występuje spadek prędkości statku i jest zmiana relacji pomiędzy oporem na wodzie spokojnej a oporem w rzeczywistych warunkach pogodowych. W niniejszym artykule zostaną przedstawione numerycznie obliczone charakterystyki napędowe z krzywymi mocy obliczonymi dla ustalonych parametrów pogodowych. Na podstawie znajomości takich charakterystyk można bardziej racjonalnie zmieniać parametry pracy układu napędowego przy zmiennych warunkach pogodowych i przewidywać parametry eksploatacyjne statku (np. prędkość), szczególnie przy pogarszającym się stanie morza.

2. Numeryczne obliczanie charakterystyk napędowych

Punkt pracy układu napędowego jest ustalony, gdy całkowity opór statku jest równoważony naporem śruby a moment na śrubie będzie równy momentowi obrotowemu silnika napędowego. Te dwa warunki opisane są układem dwóch równań nieliniowych [3]:

$$T = \frac{R_c}{1-t} \quad (1)$$

$$Q = \frac{P_D}{2\pi n} \quad (2)$$

gdzie:

- T, Q – napór i moment obrotowy śruby napędowej,
- R_c – całkowity opór statku z uwzględnieniem wiatru i fali,
- t – współczynniki ssania,
- P_D – moc doprowadzona z silnika napędowego do stożka śruby,
- n – obroty śruby.

Napór i moment śruby napędowej są równe:

$$T = K_T \rho_w D_p^n n^2 \quad (3)$$

$$Q = K_Q \rho_w D_p^5 n^2 \quad (4)$$

gdzie:

- K_T, K_Q – współczynniki: naporu i momentu,
 ρ_w – gęstość wody,
 D_p – średnica śruby.

Dla śruby stałej (o skoku ustalonym), współczynniki naporu i momentu są aproksymowane wyrażeniami:

$$K_T = A_0 + A_1 J + A_2 J^2 + A_3 J^3 \quad (5)$$

$$K_Q = B_0 + B_1 J + B_2 J^2 + B_3 J^3 \quad (6)$$

gdzie współczynniki $A_0 \dots B_3$ są współczynnikami aproksymującymi charakterystyki naporu i momentu a J jest współczynnikiem posuwu:

$$J = \frac{V(1-w)}{D_p \cdot n} \quad (7)$$

gdzie:

- V – prędkość statku,
 w – współczynnik strumienia nadążającego.

Zależność pomiędzy mocą P_D a mocą N silnika napędowego jest następująca:

$$P_D = N \cdot \eta_s \cdot \eta_R \quad (8)$$

gdzie:

- η_s – sprawność linii wałów,
 η_R – sprawność rotacyjna.

Pole pracy silnika napędowego jest ograniczone charakterystykami właściwymi dla danego typu (producenta) silnika.

Występujący w równaniu (1) opór całkowity R_c jest równy [4]:

$$R_c = R + \Delta R \quad (9)$$

gdzie:

- $R(V^2)$ – opór na wodzie spokojnej,
 ΔR – dodatkowy opór statku, głównie od wiatru i falowania,

$$\Delta R = X_A + X_W + \Delta X_R \quad (10)$$

gdzie:

- X_A – dodatkowy opór od wiatru,
- X_W – dodatkowy opór od falowania.

Dodatkowy opór od wiatru i falowania zależy nie tylko od parametrów wiatru czy falowania a także od prędkości i kursu statku względem wiatru i fali:

$$X_A = f(V_A, V, \beta_A) \quad (11)$$

$$X_W = f(H_W, T, V, \beta_W)$$

gdzie:

- V_A, β_A – średnia prędkość wiatru i jego kierunek względem statku,
- H_W, T, β_W – średnia wysokość fali i okres oraz kierunek względem statku.

Rozwiązując numerycznie równanie (1) i (2) z uwzględnieniem związków (3) – (11) można wyznaczyć poszczególne zależności składające się na charakterystyki napędowe np.:

- $T(V, n)$ – napór osiągnięty na śrubie,
- $Q(V, n)$ – moment na śrubie,
- $\eta_0(V, n)$ – sprawność śruby,
- $P_D(V, n)$ – moc na stożku śruby,
- $V(P_D, n)$ – charakterystyka prędkości statku.

3. Przykładowe obliczone charakterystyki napędowe dla kontenerowca

Charakterystyki napędowe zostały obliczone dla kontenerowca o wymiarach:

długość	$L = 153,40$ m,
szerokość	$B = 22,30$ m,
zanurzenie	$T = 8,10$ m,
wyporność	$D = 14\,100$ m ³ ,
prędkość eksploatacyjna	$V = 18,5$ węzła.

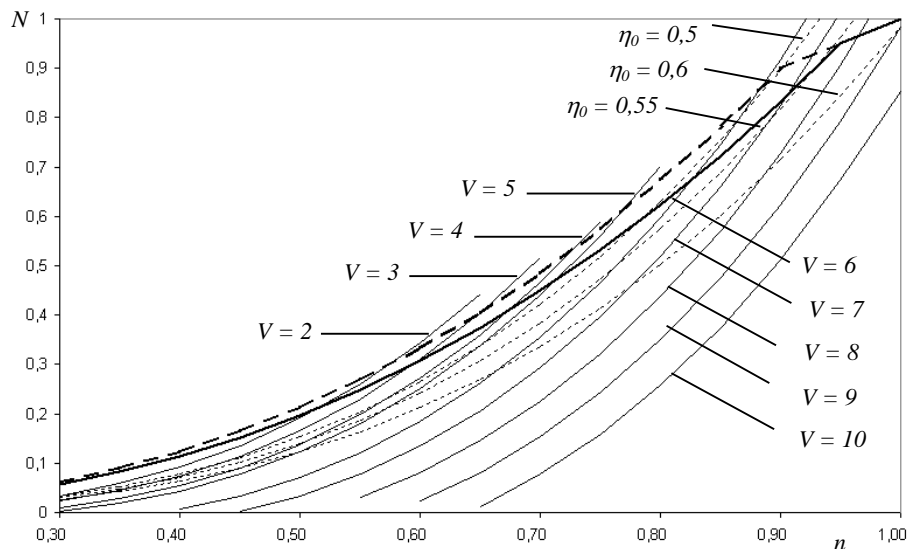
Parametry napędu:

moc nominalna silnika	$N_n = 8500$ kW
obroty nominalne silnika (i śruby)	$n_n = 2,6$ 1/s

średnica śruby	$D_p = 5,196 \text{ m}$
ilość skrzydeł śruby	$Z = 4$
współczynnik skoku	$P/D = 0,75$
współczynnik powierzchni	$a_E = 0,568$
współczynnik strumienia nadążającego	$w = 0,219$
współczynnik ssania	$t = 0,174$
sprawność linii wałów	$\eta_{LW} = 0,98$
„sprawność” rotacyjna	$\eta_R = 1,0044$
„sprawność” kadłuba	$\eta_K = 1,0576$

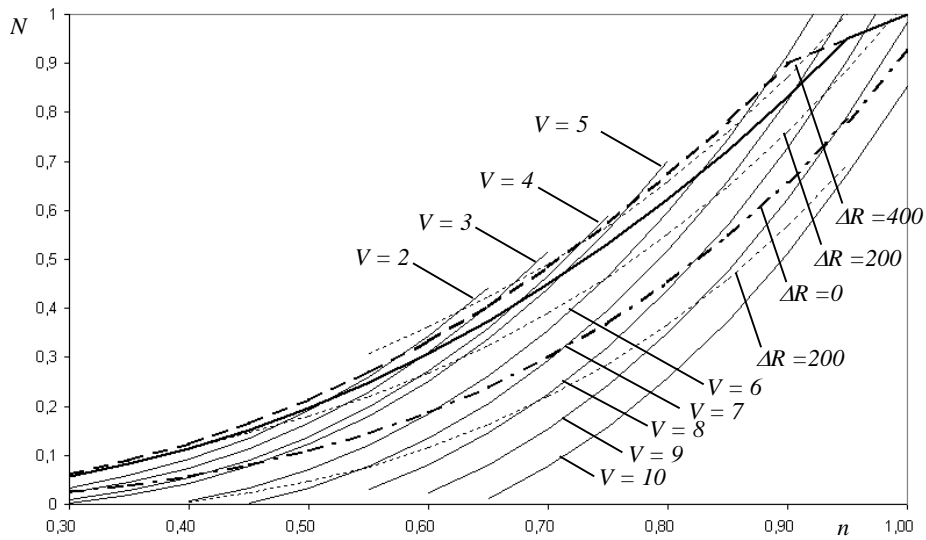
Na statku nie ma przekładni, więc obroty śruby są równe obrotom silnika napędowego. Charakterystyki napędowe są przedstawiane na polu pracy silnika napędowego, a ponieważ moc, moment i napór śruby są obliczane na stożku śruby, to moc silnika napędowego została przeliczona też na stożek śruby napędowej. Dla powyższych danych statku (kontenerowca) i jego układu napędowego, obliczone charakterystyki napędowe przedstawiono na rysunkach:

- 1 – krzywe stałej prędkości statku i stałej sprawności śruby,
- 2 – krzywe stałej prędkości statku i stałego dodatkowego oporu od wiatru i fali,
- 3 – krzywe stałej prędkości statku, stałego naporu śruby napędowej i stałej prędkości wiatru (statek płynie pod wiatr).

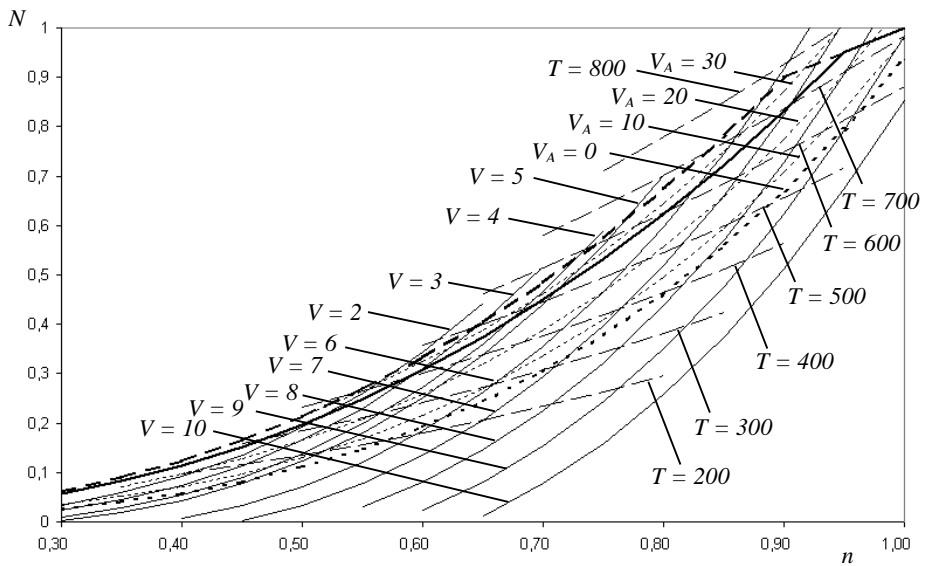


Rys. 1. Wykres stałych prędkości statku i stałej sprawności śruby

Fig. 1. The characteristics of the constant ship's speed and the constant propeller's efficiency



Rys. 2. Wykres stałych prędkości statku i stałego dodatkowego oporu
Fig. 2. The characteristics of constant ship's speed and the constant added resistance



Rys. 3. Wykres stałych prędkości statku i stałego napędu i stałej prędkości wiatru
Fig. 3. The characteristics of constants: ship's speed, thrust and wind velocity

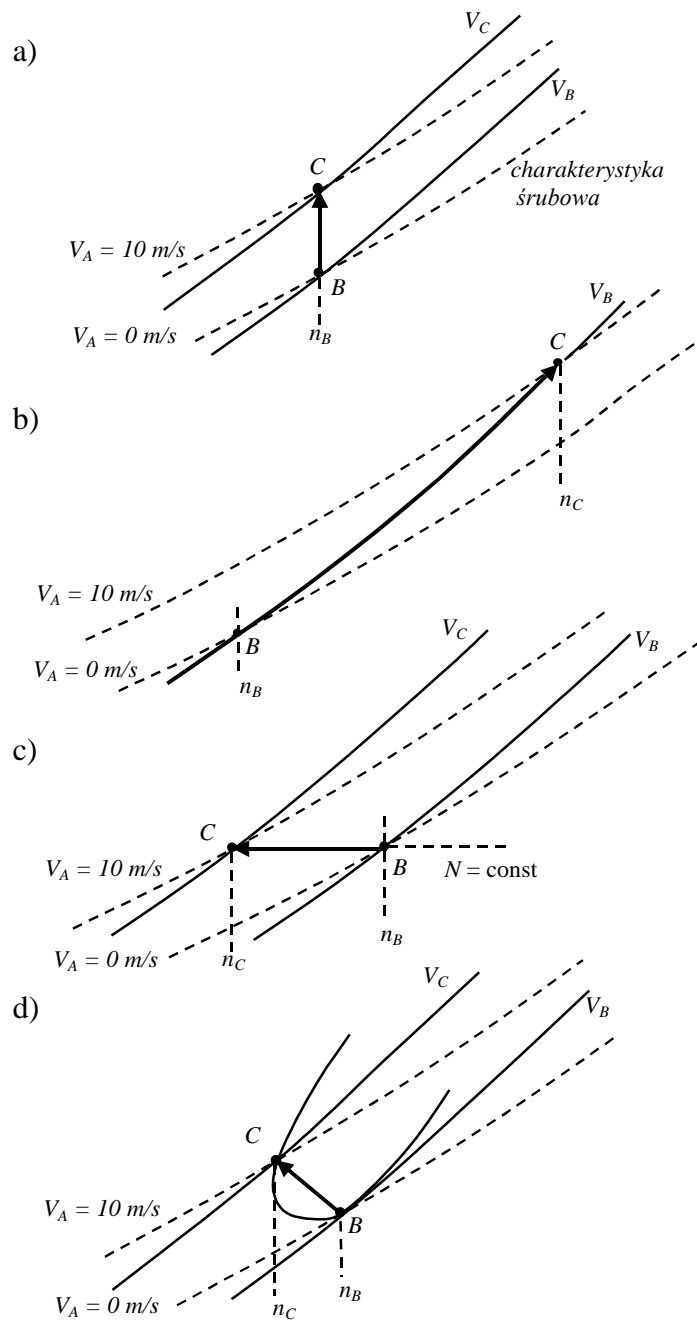
Na rysunku 3 zamieszczono charakterystyki stałej prędkości wiatru wiejącego w określonym kierunku względem kierunku ruchu statku (w tym przypadku statek płynie pod wiatr – takie charakterystyki można przedstawić dla dowolnych kierunków wiatru i/lub fali). Takie charakterystyki umożliwiają prawidłowy wybór punktu pracy układu napędowego w zmiennych warunkach pogodowych lub przewidywanie np. maksymalnej prędkości statku przy pogarszającym się stanie morza.

Możliwości zmiany punktu pracy układu napędowego (śruba o skoku ustalonym) wywołane przyrostem dodatkowego oporu, w tym przypadku od wiatru (statek płynie pod wiatr), przedstawiono na rysunku 4. W tym przykładzie w pozycji wyjściowej (punkt B), statek płynie na wodzie spokojnej z prędkością V_B ($V_A = 0$) i obrotami śruby n_B . Od wiatru wiejącego z prędkością $V_A > 0$ od dziobu powstaje dodatkowy opór. Są możliwe następujące zmiany punktu pracy (punkt C) układu napędowego (rys. 4):

- a) zachowując stałe obroty n_B , zwiększa się dawkę paliwa (rośnie moc silnika) aż do osiągnięcia punktu C na charakterystyce V_A , prędkość statku spada do wartości V_C ;
- b) zachowując stałą prędkość statku V_B zwiększa się dawkę paliwa (rośnie moc silnika i obroty do wartości n_C) aż do osiągnięcia punktu C (stałą prędkość statku można utrzymać aż do krzywej granicznej dla danego silnika);
- c) zachowując stałą moc silnika osiąga się punkt C, zmniejsza się prędkość statku do V_C oraz obroty silnika do n_C ;
- d) utrzymując stałe jednostkowe zużycie paliwa aż do osiągnięcia punktu C zmniejsza się prędkość statku i obroty silnika.

Wymienione 4 możliwości osiągnięcia nowego punktu pracy układu napędowego statku przy wzroście oporu – w tym przypadku – prędkości wiatru mogą być stosowane przy różnych przyjętych kryteriach, np.: stałej prędkości statku, maksymalnej możliwej do osiągnięcia prędkości statku, minimalnego zużycia paliwa czy stałej lub maksymalnej sprawności śruby napędowej.

Przedstawiona numeryczna metoda prognozowania charakterystyk napędowych statku i poszukiwania punktu pracy układu napędowego może być stosowana w dowolnych zmiennych warunkach pogodowych (w artykule podano obliczenie tylko dla jednego przypadku – statek płynie pod wiatr).



Rys. 4. Przykłady zmiany punktu pracy układu napędowego
 Fig.4. An example of the change of the propulsion working point

Literatura

1. Chachulski K., *Podstawy napędu okrętowego*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988.
2. Chachulski K., *Energetyczne problemy eksploatacji napędów okrętowych*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1991.
3. Szelangiewicz T., Żelazny K., *Symulacja pracy śruby napędowej podczas pływania statku po sfalowanej wodzie*, EXPLO-SHIP 2002, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Zeszyty Naukowe nr 65, s. 323 – 334.
4. Szelangiewicz T., Żelazny K., *Prediction of Mean Long-Term Ship Service Speed on Ocean Routes*, Marine Technology Transactions, Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk, Vol. 14, 2003, pp. 105 – 114.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adresy Autorów

prof. dr hab. inż. Tadeusz Szelangiewicz
mgr inż. Katarzyna Żelazny
Politechnika Szczecińska
Wydział Techniki Morskiej
Katedra Oceanotechniki i Projektowania Systemów Morskich
al. Piastów 41, 71-065 Szczecin