

**Adam Charchalis**  
**Akademia Morska w Gdyni**

## **PROBLEM ŚRUB NIEPRACUJĄCYCH W OKRĘTOWYCH UKŁADACH NAPĘDOWYCH WIELOŚRUBOWYCH**

### **STRESZCZENIE**

Jednostki szybkie projektowane są na maksymalne prędkości pływania, natomiast z reguły eksploatowane są prędkościami znacznie mniejszymi, tzw. częściowymi. Wymaga to wyłączenia z pracy poszczególnych silników czy śrub napędowych. Śruby niepracujące są holowane przez kadłub okrętu, pracują w zakresie tzw. pracy turbinowej i przekazują moment obrotowy na wał oraz wytwarzają ujemny napór, czyli powodują dodatkowy opór. Momenty i napory występujące na śrubie w tym zakresie pracy można oszacować w oparciu o uniwersalne charakterystyki hydrodynamiczne śrub. Zaprezentowano metodykę oraz przykład obliczania oporów śrub swobodnie obracających się i zastopowanych dla założonego układu napędowego okrętu.

#### Słowa kluczowe:

okręty szybkie, śruby okrętowe, układy napędowe wielośrubowe.

### **WSTĘP**

Zapotrzebowanie mocy do napędu okrętów zależy od ich wielkości (wyporności) oraz od prędkości pływania. Problem jest szczególnie istotny dla jednostek szybkich, ponieważ prędkość pływania rzutuje na znaczną moc napędu, natomiast ograniczona wyporność, minimalizująca wielkość oporów pływania, powoduje ograniczone zanurzenie okrętu oraz objętość wewnątrz kadłuba. Ma to wpływ na liczbę, rodzaj, moc i gabaryty silników głównych oraz śrub. Z uwagi na zapotrzebowanie mocy do napędu jednostek szybkich oraz małe zanurzenie okrętu powodujące ograniczenia średnicy przy doborze śrub, układy napędowe tego typu jednostek są wielosilnikowe i wielośrubowe [3, 4, 6].

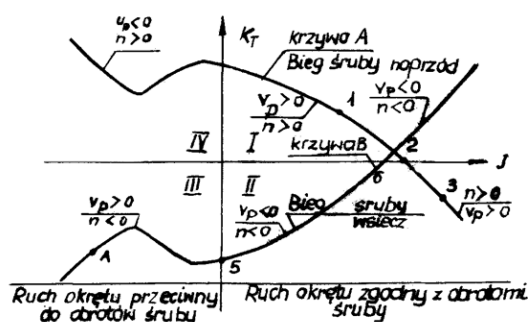
Jednostki szybkie mają odpowiednią specyfikę eksploatacji. Projektowane na maksymalne prędkości pływania, z reguły eksploatowane są prędkościami znacznie mniejszymi, tzw. częściowymi. Wymaga to wyłączenia z pracy poszczególnych silników czy też śrub napędowych. Śruby niepracujące są holowane przez kadłub okrętu, pracują w zakresie tzw. pracy turbinowej i przekazują moment obrotowy na wał oraz wytwarzają ujemny napór, czyli opór [2, 3, 8]. Opór dodatkowy spowodowany niepracującymi śrubami należy uwzględniać podczas projektowania układu napędowego i analizy jego osiągnięć na poszczególnych zakresach pracy.

Moment obrotowy generowany na śrubie jest przekazywany na wał i po przekroczeniu momentów oporów tarcia występujących w łożyskach powoduje obracanie się elementów ruchomych, i to z prędkościami obrotowymi o znacznej wartości. Dla zabezpieczenia przed zatarciem się silnika czy też przekładni często na wale napędowym w tego typu układach stosuje się hamulce. Określenie niezbędnego momentu hamowania jest potrzebne dla zapewnienia odpowiedniej pracy hamulca i niedopuszczenia do wirowania wału. Występują dwa przypadki pracy śruby w zakresie turbiny — śruba swobodnie obracająca się i śruba zastopowana. Momenty i napory występujące na śrubie w ramach wyszczególnionych zakresów pracy można wygodnie oszacować w oparciu o uniwersalne charakterystyki hydrodynamiczne śrub [2, 3, 8].

## UNIWERSALNE CHARAKTERYSTYKI HYDRODYNAMICZNE ŚRUB

Charakterystyki hydrodynamiczne śrub odnoszą się do przypadku, gdy ruch okrętu odbywa się naprzód, tzn. prędkość obrotowa śruby jest dodatnia i prędkość postępową śruby jest dodatnia, w związku z czym współczynnik posuwu  $J = v_p/Dn$  także jest dodatni. Dla tego przypadku współczynniki naporu  $K_T$  i momentu  $K_Q$  mają wartości dodatnie.

Na okręcie w czasie jego eksploatacji często spotyka się z sytuacją, w której współczynniki posuwu, naporu lub momentu mogą przyjmować wartości ujemne. Dla przykładu, mogą to być: hamowanie okrętu przy ruchu naprzód i wstecz, ruch wstecz i holowanie śruby niepracującej. Wymienione przypadki nietypowej pracy śruby wskazują, że dla pełnej oceny zachowania się okrętowego układu napędowego niezbędna jest znajomość osiągnięć śruby w całym eksploatacyjnie uzasadnionym zakresie pracy. Dlatego skonstruowano tzw. uniwersalne hydrodynamiczne charakterystyki śrub swobodnych [2, 3, 8]. Przykład takiej charakterystyki dla jednego skoku śruby  $H/D$  przedstawia rysunek 1. Uniwersalne charakterystyki hydrodynamiczne śrub wykorzystywane są dla oceny własności manewrowych statku jako charakterystyki rewersowe i mogą służyć do oceny oporów swobodnie obracających się i niepracujących śrub w okrętowych układach napędowych wielowałowych.



Rys. 1. Uniwersalna hydrodynamiczna charakterystyka śruby dla  $H/D = \text{idem}$

## OPORY ŚRUB NIEPRACUJĄCYCH SWOBODNIE OBRACAJĄCYCH SIĘ LUB ZASTOPOWANYCH

W okrętowych układach napędowych wielośrubowych często może być tak, że jedna lub kilka ze śrub nie pracuje, tzn. silniki nie dostarczają do nich momentu obrotowego. Śruby te są wtedy holowane przez poruszający się okręt. Niepracująca śruba może być zastopowana na przykład za pomocą hamulca zainstalowanego na wale i nie obraca się lub może się swobodnie obracać i przekazywać moment obrotowy od śruby do silnika. Śruba pracuje wtedy jak turbina wodna i poprzez linię wału może napędzać niepracujący silnik.

### Śruba holowana zastopowana

Gdy śruba nie pracuje, jest holowana i nie obraca się, wtedy moment tarcia w linii wału jest większy niż moment rozwijany przez śrubę w zakresie jej pracy turbinowej. Przy ruchu okrętu naprzód  $v_p > 0$  i zastopowanej śrubie  $n = 0$  współczynnik posuwu  $J = v_p/Dn$  dąży do nieskończoności. Dlatego skonstruowano charakterystyki hydrodynamiczne śrub dla przypadków, gdy  $n \rightarrow 0$ , tzn. gdy  $J \rightarrow \infty$ . Zrealizowano to w ten sposób, że na osi odciętych współczynnik posuwu  $J$  zastąpiono jego odwrotnością  $J_0 = 1/J = Dn/v_p$ . Wtedy dla przypadku śruby zastopowanej  $J_0 = 0$  znajduje się w środku układu współrzędnych.

Przykładowe uniwersalne charakterystyki hydrodynamiczne śruby w układzie  $K'_T$  i  $K'_Q$  przedstawiono w [2, 3, 8]. Dla określenia oporu lub momentu obrotowego śruby zastopowanej należy na wykresie  $K'_T - f(J_0)$  w początku układu współrzędnych ( $J_0 = 0$ ) dla odpowiedniego współczynnika skoku  $H_1/D$  określić współczynniki naporu i momentu. Wtedy ujemny napór śruby zastopowanej oraz moment obrotowy wynosi:

$$R_{zast} = T' = K_T' v_p^2 D^2; \quad (1)$$

$$Q_{zast} = K_Q' \rho v_p^2 D^3. \quad (2)$$

### Śruba holowana swobodnie obracająca się

W czasie ruchu okrętu, gdy moment rozwijany przez śrubę w zakresie pracy turbinowej jest większy od momentu tarcia w linii wałów, zaczyna się ona obracać. Prędkość obrotowa rozwijana przez śrubę wynika z relacji pomiędzy momentem tarcia w linii wału i na śrubie oraz momentem obrotowym rozwijanym przez śrubę. Przy obliczeniowym określaniu oporów śrub swobodnie obracających się nieznana jest wartość prędkości obrotowej śruby. Dlatego też przede wszystkim należy oszacować moment tarcia w linii wałów i następnie współczynnik momentu tarcia równoważony przez moment obrotowy śruby pracującej w zakresie turbinowym, czyli napędzającej wał:

$$Q_{thw} = Q_{so}; \quad (3)$$

$$Q_{so} = K_Q \rho \cdot n^2 D^5. \quad (4)$$

Ze względu na to, że nieznana jest wartość prędkości obrotowej śruby, wprowadza się  $n = v_p/DJ$ , stąd  $K_Q' = K_Q/J$

$$Q = K_Q' \rho v_p^2 D^3. \quad (5)$$

### OBLICZENIA OPORÓW ŚRUB SWOBODNIE OBRACAJĄCYCH SIĘ I ZASTOPOWANYCH

Przykładowe obliczenia oporów śrub niepracujących przeprowadzono dla okrętowego układu napędowego trzyśrubowego wyposażonego w śruby trzyskrzydłowe o skoku stałym  $H_1/D = 1,175$ , średnicy  $D = 1,15$  m i współczynniku powierzchni skrzydeł  $S_0/S = 1,1$ . Moment obrotowy silnika wynosił 25 kNm. Przyjęto gęstość wody morskiej  $\rho = 1026$  kg/m<sup>3</sup>, dla  $t = 15$  °C.

Dla śruby zastopowanej ( $v_p = 0$ ,  $J_0 = 0$ ) współczynnik naporu  $K_T' = 0,32$ , a współczynnik momentu  $K_Q' = 0,057$ . Dla śruby swobodnie obracającej się istotne jest określenie momentu tarcia w linii. Moment tarcia w linii wałów jest funkcją jego prędkości obrotowej oraz długości wału. Im większa długość wału, tym bardziej wzrasta liczba łożysk i dławic, a mniejsza jest sprawność linii wału. Do określania momentu tarcia można przyjąć następujące zależności:

$$Q_{tlw} = \left( a + b \frac{n_x}{n} \right) Q; \quad (6)$$

$$Q_{tlw} = c Q \left( \frac{n_x}{n} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

gdzie:

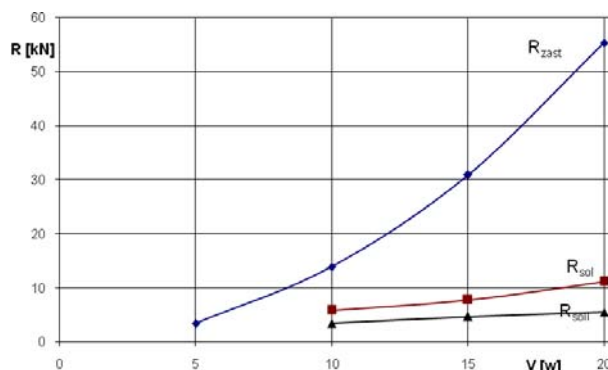
$a = \frac{1}{2}c; b = \frac{2}{3}c; c = 0,02 - 0,05$  — mniejsze wartości dla krótszych wałów;

$c = 1 - \eta_{lw}$ ;

$Q$  — obrotowy moment nominalny rozwijany przez silnik;

$n_x$  — nominalna prędkość obrotowa wału.

Podane zależności można wykorzystywać, gdy znane są na przykład z pomiarów prędkości obrotowe wałów swobodnie obracających się. Na rysunku 2. przedstawiono obliczone wartości oporu śrub niepracujących, swobodnie obracających się i zastopowanych, w zależności od prędkości pływania.



Rys. 2. Opory śrub holowanych:

1 — zastopowanych, 2 — swobodnie obracających się (I przybliżenie), 3 — swobodnie obracających się (II przybliżenie); znana prędkość obrotowa śruby

## WNIOSKI

Poprawność przyjętej metodyki obliczania oporów śrub niepracujących, swobodnie obracających się i zastopowanych potwierdzona została eksperymentalnie na jednostce rzeczywistej. Podczas badań stwierdzono, że prędkość obrotowa niepracującego wału napędzanego przez śrubę w zakresie pracy turbinowej zbliżona była do prędkości obrotowej biegu jałowego silnika głównego.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Basin J. M., Anfimov V. N., *Gidromechanika sudna. Recnoj transport*, Leningrad 1964.
- [2] Basin J. M., Miniovic J. J., *Teoria i rasciot grebnych vintov*, Sudostrojenie, Leningrad 1963.
- [3] Charchalis A., *Opory okrętów wojennych i pędniki okrętowe*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.
- [4] Charchalis A., *Układy napędowe okrętów uderzeniowych*, „Zeszyty Naukowe” WSMW, 1981, nr 2.
- [5] Charchalis A., *Propulsion systems of fast vessels with jet turbine engines*, ‘Marine Technology Transactions’, 1993, Vol. 4, pp. 23–33.
- [6] Charchalis A., *Wyniki badań różnego typu kombinowanych układów napędowych okrętu szybkiego*, „Zeszyty Naukowe” WSMW, 1981, nr 4.
- [7] Jarzyna H., *Wzajemne oddziaływanie kadłuba i pędnika statku*, „Maszyny Przepływowe”, 1993, t. 14.
- [8] Wojnowski W., *Okrętowe silownie spalinowe*, cz. I, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 1998.

**RESISTANCE OF IDLE PROPELLERS IN MARINE MULTI-PROPELLER PROPULSION SYSTEMS****ABSTRACT**

High speed vessels are designed for maximum speeds, but their factual operation speed parameters are usually considerably lower — partial speed. In such cases particular propulsion propellers and engines need to be shut down. The idle propellers are dragged by the hull and they work in the so-called turbine work mode; they transfer torque to the shaft and generate negative thrust, i.e. additional resistance. To estimate torque and thrust on a propeller in this work mode universal hydrodynamic characteristics of propellers may be used. This paper presents the methodology and an example of calculating resistance of freewheeling and locked propellers for a given marine propulsion system.

**Keywords:**

transport, high speed vessels, marine propellers, multi-propeller propulsion systems.

Recenzent dr hab. inż. Henryk Madej, prof. PŚ