

Wojciech GÓRSKI<sup>1</sup>, Zbigniew BURCIU<sup>2</sup>

Centrum Techniki Okrętowej S.A., Ośrodek Hydromechaniki Okrętu  
ul. Szczecińska 65, 80-369 Gdańsk

<sup>1</sup> wgorski@cto.gda.pl

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Eksploatacji Statku

ul. Al. Jana Pawła II 3, 81-345 Gdynia

<sup>2</sup> zbj@am.gdynia.pl

## IDENTYFIKACJA PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW WPŁYWAJĄCYCH NA ZUŻYCIE PALIWA STATKU W RZECZYWISTYCH WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono analizę charakterystyk eksploatacyjnych statku w kontekście identyfikacji parametrów decydujących o zużyciu paliwa. Analiza uzupełniona jest o przykłady wpływu wybranych parametrów na osiągi statku. Jako najbardziej istotne parametry wskazane zostały: prędkość, zanurzenie i trym jednostki. Omówiono także wpływ porostania powierzchni kadłuba na zużycie paliwa.

Słowa kluczowe: statek, prędkość, przegłębienie – trym statku, parametry.

### WPROWADZENIE

Eksploatacja handlowa statku są to działania zmierzające do maksymalizacji wpływów z przewożonego ładunku i pasażerów, natomiast eksploatacja techniczna statku jest to utrzymanie statku w pełnej gotowości technicznej.

Do podstawowych parametrów techniczno-eksploatacyjnych statku należą: długość statku L, długość największa lub całkowita LOA, długość pomiędzy pionami LBP, szerokość statku B, zanurzenie statku T, wyporność D, nośność DWT, trym statku<sup>1</sup>, prędkość v.

Prędkość jest jednym z ważniejszych parametrów techniczno-eksploatacyjnych, charakteryzujących statek i ściśle związanym z zastosowaniem określonego rodzaju napędu, jak również wynikającym z parametrów eksploatacyjnych, których operatorzy i kapitan statku nie uwzględniają przy wykonywaniu zadania transportowego. Brak informacji w dokumentacji statkowej na temat wpływu trymu i zanurzenia statku na obniżenie dobowego zużycia paliwa powoduje że, kapitan uwzględniając trym, ma na uwadze jedynie „dzielność morską statku”.

Jednostką prędkości jest węzeł<sup>2</sup>: rozróżnia się następujące rodzaje prędkości:

- prędkość maksymalną, którą można osiągnąć wykorzystując 100% mocy maszyn,
- prędkość morską uzyskiwaną przy dobrych warunkach pogodowych w trakcie wykorzystywania mocy (około 75%-85%),
- prędkość eksploatacyjną, czyli prędkość, jaką osiąga statek w danych warunkach,
- prędkość ekonomiczną, jaką powinien utrzymywać statek, aby spalając określoną ilość paliwa przebył najdłuższy odcinek drogi.

<sup>1</sup> Trym - przegłębienie statku (na rufę, na dziób).

<sup>2</sup> 1 węzeł oznacza, że statek porusza się z prędkością 1 mili morskiej na godzinę (1 Mm/godz.). 1 mila morska 1852 m.

Gwałtowny wzrost cen paliwa jest w ostatnich latach głównym czynnikiem zmian w transporcie morskim. Zmiany te obejmują zarówno projektowanie i budowę nowych zoptymalizowanych pod kątem zużycia paliwa jednostek jak i modyfikację parametrów eksploatacyjnych jednostek już używanych. Szczególnie te ostatnie budzą szczególne zainteresowanie armatorów, szukających metod redukcji zużycia paliwa poprzez optymalny dobór podstawowych parametrów eksploatacyjnych.

## 1. CZYNNIKI DETERMINUJĄCE POZIOM ZUŻYCIA PALIWA

Dla większości jednostek handlowych napęd główny ma największy udział w bilansie energetycznym, stąd możliwość ograniczenia jego mocy ma decydujący wpływ na poziom zużycia paliwa a co za tym idzie na koszty eksploatacji statku. Kluczowe w tym zakresie są decyzje podejmowane na etapie projektowania statku, zarówno we wczesnym stadium koncepcyjnym jak i w trakcie realizacji projektu technicznego.

Na etapie koncepcji armator decyduje o wielkości jednostki i jej prędkości eksploatacyjnej. Właściwy dobór parametrów stosunku prędkości statku do jego długości, w sposób zasadniczy wpływa na poziom mocy napędu głównego. Błędne decyzje projektowe podjęte na tym etapie nie są możliwe do zniwelowania bez zasadniczych zmian podstawowych parametrów statku a więc często wymuszają powtórzenie etapu koncepcyjnego.

Na kolejnym etapie projektowania możliwe jest dalsze zredukowanie mocy napędu głównego poprzez optymalizację kształtu kadłuba oraz geometrii pędnika. Moc na sprzęgle silnika głównego jest obliczana w zależności od oporu całkowitego kadłuba, prędkości i sprawności ogólnonapędowej.

$$P_B = R \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_D} \cdot \frac{1}{\eta_S} \quad (1)$$

gdzie:  $P_B$  – moc silnika [kW],

$R$  – opór całkowity kadłuba [kN],

$V$  – prędkość statku [m/s]

$\eta_D$  – sprawność ogólnonapędowa [-]

$\eta_S$  – sprawność linii wału [-].

Opór kadłuba zależy bezpośrednio od jego kształtu, natomiast na wartość sprawności ogólnonapędowej wpływ ma zarówno kształt kadłuba jak i geometria pędnika a także wzajemne oddziaływanie pomiędzy nimi. Sprawność linii wału zależy od układu przeniesienia napędu z silnika głównego do śruby – dla typowych rozwiązań waha się pomiędzy 0,95 a 0,99.

Właściwe wykorzystanie technik komputerowych - numerycznej mechaniki płynów i eksperymentalnych pozwala na zredukowanie mocy zapotrzebowanej o 3-10%. W praktyce ośrodków badań modelowych przypadki obniżenia mocy na poziomie 15-20% nie należą do odosobnionych.

Biorąc pod uwagę średnio 25-35 letni cykl eksploatacji jednostki, nawet nieznaczna redukcja mocy skutkuje istotnymi oszczędnościami paliwa,. Dla przykładu dla średniej wielkości kontenerowca 4100 TEU, 4% procentowe obniżenie zapotrzebowania mocy skutkuje obniżeniem kosztów paliwa o ponad 766 tys. USD rocznie (przy obecnej cenie paliwa na poziomie 650 USD/t) [2].

Możliwości redukcji zużycia paliwa nie ograniczają się do etapu projektowania jednostki. Zakończenie procesu projektowania i budowy statku nie ustala całkowicie poziomu zużycia

paliwa. Jest on w głównej mierze wynikiem działań optymalizacyjnych, podjętych na etapie projektowania, jednak warunki eksploatacji mogą go istotnie zmienić. Parametry eksploatacyjne statku, na które wpływ ma jego załoga, silnie warunkują poziom zużycia paliwa. Do podstawowych parametrów eksploatacyjnych statku należą:

- prędkość,
- zanurzenie,
- trym.

Niestety nie da się z góry ustalić, który z tych parametrów jest decydujący.

Przykładem ilustrującym to zagadnienie jest wpływ doboru gruszki dziobowej statku. Gruszka dziobowa (rys. 1) jest elementem kadłuba statku stosowanym w celu zmniejszenia fali dziobowej a w konsekwencji oporu, jaki stawia kadłub poruszający się w wodzie. Efektywne działanie gruszki wymaga odpowiedniego jej zanurzenia pod swobodną powierzchnią wody. Gruszka zbyt głęboko zanurzona lub wynurzona ponad powierzchnię wody nie spełnia swojej funkcji, przeciwnie może prowadzić do wzrostu oporu kadłuba.

Równie istotnym parametrem jest prędkość statku, gdyż spadek oporu przy stosowaniu gruszki obserwowany jest dla wyższych prędkości (liczb Froude'a przekraczających 0.2), jednak efektywność gruszki dziobowej maleje przy dalszym wzroście prędkości, ze względu na jej zanurzanie się wynikające z dynamicznego osiadania i trymu statku. Jest ona efektywna w stosunkowo wąskim zakresie parametrów eksploatacyjnych.

Znajomość tego zakresu pozwala jednak na taki dobór parametrów eksploatacyjnych, na przykład przegłębenia statku, przez odpowiednie balastowanie, aby osiągnąć zamierzony efekt redukcji oporu.

Na rysunku 1 przedstawiono wpływ prędkości modelu statku na wytwarzaną przez niego falę.



Rys. 1. Działanie gruszki dziobowej dla nieoptymalnej (po lewej) i optymalnej (po prawej) prędkości.  
Źródło: materiały CTO S.A.

Powyższy przykład wskazuje, że dobór parametrów eksploatacyjnych statku, w celu zredukowania zużycia paliwa przez jego silniki główne jest zagadnieniem złożonym, na które wpływ ma szereg czynników.

Dalszych informacji dostarcza analiza składowych oporu całkowitego:

$$R = R_T + R_{AP} + R_{AA} \quad (2)$$

gdzie:  $R_T$  – opór kadłuba bez części wystających,

$R_{AP}$  – opór części wystających (stępki, wsporniki wału, stabilizatory itp.),

$R_{AA}$  – opór powietrza.

Dla typowych jednostek największym składnikiem oporu całkowitego jest opór kadłuba bez części wystających, który z kolei dzieli się na opór ciśnienia i opór tarcia. W zależności od typu jednostki i prędkości pływania proporcje między wspomnianymi składnikami oporu mogą się zmieniać w szerokim zakresie:

$$\begin{aligned}
 20\% < \frac{R_P}{R_{BH}} < 40\% \\
 80\% > \frac{R_F}{R_{BH}} > 60\%
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

gdzie:  $R_P$  – opór ciśnienia,

$R_F$  – opór tarcia,

$R_{BH}$  – opór kadłuba bez części wystających.

Opór tarcia silnie zależy od stanu powierzchni poszycia statku a co za tym idzie pogarsza się w czasie eksploatacji na skutek porastania kadłuba. Zgodnie z [1] opór tarcia może przyrastać o 0.25 - 0.5% dziennie, w zależności od rejonu pływania.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły przypadku żeglugi w dobrych warunkach pogodowych tzn. słabym wietrze i nieznacznej fali. Żegluga w trudnych warunkach hydrometeorologicznych związana jest ze wzrostem oporu całkowitego z uwagi na dodatkowe opory od fali i wiatru. Wspomniane opory nie zależą jedynie od warunków zewnętrznych, ale także od prędkości i kursu statku. Wielkości dodatkowych oporów są istotne i przykładowo dla jednostki o długości około 140 m i prędkości wiatru rzędu 30 m/s dodatkowy opór od wiatru wiejącego w kierunku dziobu może osiągać wartości porównywalne do oporu kadłuba na wodzie spokojnej.

Podobnej analizy jak dla oporu całkowitego dokonać można w przypadku sprawności ogólnonapędowej. W tym przypadku warunki eksploatacji, w szczególności intensywność porastania pędnika oraz warunki pogodowe mogą wpłynąć na jej obniżenie. Istotnymi parametrami są także zanurzenie i trym, gdyż w sposób pośredni wpływają na rozległość zjawisk kawitacyjnych na pędniku. Nadmierna kawitacja powoduje obniżenie sprawności śruby, co bezpośrednio przekłada się na spadek sprawności.

Jak wynika z przedstawionej analizy podstawowymi parametrami wpływającymi na wielkość zapotrzebowania mocy silników głównych w trakcie eksploatacji są zanurzenie i prędkość jednostki (choć zwykle nie ma możliwości zmiany tych parametrów w szerokim zakresie w trakcie rejsu) oraz trym statku.

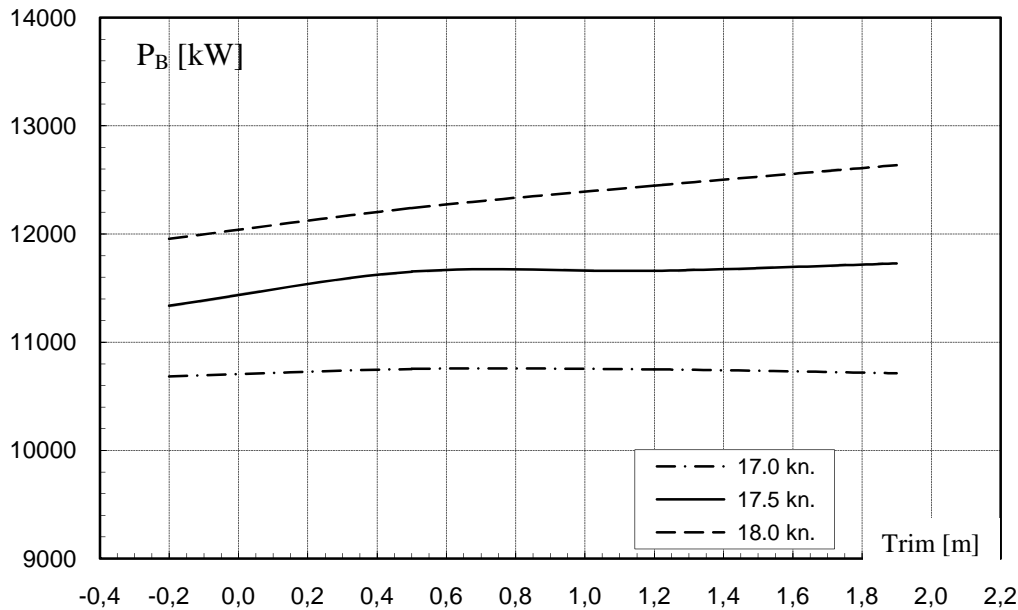
Kluczowym parametrem jest także stan powierzchni kadłuba na skutek porastania, choć w tym wypadku jego zmiana wymaga wyłączenia jednostki z eksploatacji (dokowanie).

Znajomość wpływu poszczególnych parametrów na wartość zapotrzebowanej mocy silników pozwoliłaby na dobór ich optymalnych wartości dla zadanych:

- warunków żeglugi,
- stanu załadowania,
- stanu powierzchni kadłuba.

Niestety z uwagi na wzajemne powiązania tych parametrów określenie ich wpływu na zapotrzebowanie mocy, na etapie projektowania jest kłopotliwe i czasochłonne a więc siłą rzeczy ograniczone jedynie do wąskiego zakresu ich zmienności. Przykład takiej analizy zilustrowany jest na rys. 2.

Warunki, w jakich jednostka jest eksploatowana są daleko szersze od tych, dla których określono podstawowe zależności dotyczące mocy napędu głównego. Brak wiedzy kapitana statku, starszego mechanika w tym zakresie powoduje, że często statki eksploatowane są w warunkach powodujących nadmierne zużycie paliwa.



Rys. 2. Zmiana mocy silnika w zależności od trymu i prędkości masowca o długości 200m.

Źródło: materiały CTO S.A.

## 2. OKREŚLENIE ZALEŻNOŚCI ZUŻYCIA PALIWA OD PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH

Stosunkowo dokładne określenie wielkości chwilowego zużycia paliwa na statku nie stanowi obecnie problemu. Wykorzystywane mogą być bezpośrednie metody oparte o pomiar wielkości przepływu w instalacji zasilania paliwem lub metody pośrednie oparte o pomiar mocy na wale silnika głównego.

Równoległe ze zużyciem paliwa rejestrowane mogą być także podstawowe parametry eksploatacyjne statku oraz warunki żeglugi. Uzyskany w ten sposób zbiór danych pozwala na wzajemne powiązanie zarejestrowanych wielkości. Uzyskane w ten sposób informacje nie pozwalają jednak na bezpośrednią analizę kluczowych parametrów wpływających na zużycie paliwa, ze względu na ciągłą zmienność warunków, w jakich realizowana jest żegluga:

- warunki pogodowe,
- głębokość akwenu,
- obecność prądów morskich pływowych,
- zmienne zasolenie wody.

Z tego względu pierwszym etapem analizy powinna być korekta otrzymanych rejestracji do umownych standardowych warunków żeglugi, najczęściej zdefiniowanych, jako żegluga na akwenu w założonych warunkach:

- nieograniczona głębokość,
- ustalona temperatura i gęstość wody,
- warunki pogodowe poniżej przyjętych warunków granicznych.

Tak skorygowane dane pozwalają na określenie wpływu zmian zanurzenia i trymu na wielkość zużycia paliwa, jednak obciążone są wpływem stanu powierzchni kadłuba, trudnym do bezpośredniego określenia w trakcie żeglugi.

Uwzględnienie tego efektu możliwe jest w oparciu o dane statystyczne oraz porównanie rejestracji wykonanych w podobnych warunkach żeglugi, ale w różnych okresach od momentu czyszczenia kadłuba.

Na początku eksploatacji jednostki, gdy nie ma do dyspozycji znacznej ilości danych zarejestrowanych w różnych warunkach eksploatacyjnych, poprawki należy wykonać w oparciu o metody empiryczne, na przykład wskazane w [3], stopniowo dostosowując je do charakterystyk analizowanego statku. Uzyskany w ten sposób model wpływu kluczowych parametrów na zużycie paliwa wykorzystywany może być do określania optymalnych parametrów eksploatacyjnych statku.

### WNIOSKI

Identyfikacja kluczowych parametrów eksploatacyjnych wpływających na poziom zużycia paliwa statku stanowi pierwszy etap opracowania metody wyznaczania optymalnych wartości tych parametrów. Jak wynika z przedstawionej analizy podstawowe znaczenie z uwagi na zużycie paliwa mają: prędkość, zanurzenie, trym.

Prędkość statku jest parametrem, który zmieniany może być jedynie w wąskim zakresie z uwagi na potrzebę dotrzymania założonego przez armatora czasu przybycia do portu ETA (*estimated time of arrival*). Pozostałe parametry mogą być zmieniane w trakcie rejsu w stosunkowo szerokim zakresie przez właściwe balastowanie statku. Wyznaczenie optymalnych wartości tych parametrów wymaga jednak przygotowania modelu obrazującego ich wpływ na poziom zużycia paliwa. Ogólny model musi być następnie dostrojony w celu uwzględnienia specyfiki danego statku. Proces ten należy zrealizować w oparciu o rejestracje wykonane w trakcie eksploatacji jednostki w różnych stanach załadowania i zmiennych warunkach pogodowych. Opracowanie wspomnianego modelu oraz implementacja metod sztucznej inteligencji w celu jego kalibracji w oparciu o dane rejestrowane w trakcie rejsu jest przedmiotem bieżących badań. Celem końcowym tych prac jest przygotowanie programu komputerowego wspomagającego decyzje kapitana w zakresie doboru optymalnych pod względem zużycia paliwa parametrów eksploatacyjnych statku.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Dudziak J., Teoria okrętu, Gdańsk, 2008
- [2] Harries S., Abt C., Heimann J., Hochkirch K.: Advanced hydrodynamic design of container carriers for improved transport efficiency, Design & Operation of Container Ships, RINA, London, 2006
- [3] ITTC, Full Scale Measurements, Speed and Power Trials, Analysis of Speed/Power Trial Data, Recommended Procedure No. 7.5-04-01-01.2, 2005

### **IDENTIFICATION OF KEY PARAMETERS INFLUENCING THE SHIP FUEL CONSUMPTION IN REAL OPERATIONAL CONDITIONS**

#### **Abstract:**

The paper presents the problem of the identification of key parameters for the fuel consumption in ship operation. Discussion is supplemented by the presentation of the examples of selected parameters influence on ship performance. Speed, draught and trim are selected as the most influencing parameters with reference to fuel consumption. Furthermore the impact of the hull surface fouling is reviewed.

Key words: ship, fuel consumption, key parameters.