

Metoda określania zapotrzebowania energii do napędu statku, energii elektrycznej i wydajności kotłów dla nowoczesnych statków pasażerskich przy wykorzystaniu metod statystycznych

Method of determining energy demand for main propulsion, electric power and boiler capacity for modern cruise liners by means of statistic methods

Mariusz Giernalczyk*, Zygmunt Górski

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Siłowni Okrętowych
81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87, tel. 058 69 01307 lub 324, *e-mail: magier@am.gdynia.pl

Słowa kluczowe: statek pasażerski, napęd główny, kotły, elektrownia

Abstrakt

W artykule przedstawiono oryginalną metodę określania zapotrzebowania energii do napędu statku, energii elektrycznej oraz wydajności kotłów dla nowoczesnych statków pasażerskich, na etapie wstępnego projektowania statku przy wykorzystaniu metod statystycznych.

Key words: passenger ship, main propulsion, boilers, electric power

Abstract

The article presents an original method of determining energy demand for ship propulsion, electrical power and boiler capacity for modern cruise liners at the preliminary stage of ship designing by means of statistic methods of calculations.

Wstęp

Istnieje wiele metod pozwalających w sposób przybliżony określić zapotrzebowanie energii mechanicznej, elektrycznej i cieplnej dla statku. Przykładowo wstępne określenie energii do napędu statku można wykonać metodami Papiela, Guldhamera–Harvalda, Hansena, Holtropa lub Serią 60. Metody te opierają się na żmudnych obliczeniach, wymagają wyznaczenia dużej liczby współczynników i późniejszych korekt, a ich dokładność nie jest zadowalająca. Dlatego potrzebą stało się opracowanie takiej metody czy też gotowych wzorów, które by w sposób szybki i prosty pozwalały z zadowalającą dokładnością określić zapotrzebowanie na energię dla projektowanej jednostki.

W pracy podjęto próbę opracowania gotowych wzorów przy wykorzystaniu metod statystycznych [1, 2]. W tym celu sporządzono listę statków podobnych (listę referencyjną), w której zamieszczono podstawowe parametry konstrukcyjne 30 wybranych nowoczesnych statków pasażerskich zbudowanych w ostatnich latach lub budowanych aktualnie w stocznjach zagranicznych [3]. Spośród parametrów konstrukcyjnych statków w zestawieniu zamieszczono te, które w sposób logiczny i funkcjonalny wiążą się z zapotrzebowaniem na energię do napędu statku, energię elektryczną oraz wydajnością kotłów. Wytypowane do listy statków podobnych jednostki pochodzą głównie z opracowań *The Royal Institution of Naval Architects*, skupiających najwybitniejszych przedstawicieli

z dziedziny gospodarki morskiej z całego świata, zamieszczających swoje opracowania w roczniku *Significant Ships of Year*. Daje to gwarancję racjonalnego i obiektywnego doboru jednostek, a z drugiej strony zapewnienie, iż te jednostki stanowią reprezentatywną grupę.



Rys. 1. Największy pod względem wyporności statek pasażerski na świecie *Freedom of the seas* [zdjęcie Wikipedia]
Fig. 1. The world's largest passenger ship in the respect of displacement [image Wikipedia]

Statki pasażerskie przeznaczone są do transportu ludzi oraz towarów, a ich budowa zależy od rodzaju żeglugi, jaką uprawiają, i jest to:

- żegluga liniowa pasażerska,
- żegluga wycieczkowa,
- żegluga promowa.

W przypadku dwóch pierwszych rodzajów statki nie różnią się między sobą, a nawet prowadzą oba rodzaje żeglugi, jednakże żegluga liniowa niemal już nie istnieje z uwagi na powszechność transportu lotniczego. Ta właśnie grupa statków (pasażersko-wycieczkowych), nazywana w języku angielskim *cruise liners*, została poddana badaniom statystycznym. Statki żeglugi promowej zostały poddane zupełnie odrębnym badaniom statystycznym, a ich rezultaty zamieszczono w publikacji [4].

Ze wstępnej analizy listy statków podobnych wynika, iż:

- napęd główny większości tych jednostek (22 statki) to napęd diesel-elektryczny, dwa statki posiadają układ COGES (*Radiance of the seas*, *Millenium*) oraz CODAG (*Queen Mary2*). Kilka starszych statków posiada napęd przekładniowy, tj. silniki średnioobrotowe przekazujące poprzez przekładnie mechaniczne napęd na śruby. Prędkości osiągane przez statki pasażerskie wynoszą ok. 20–27 węzłów;
- elektrownię tworzą najczęściej spalinowe zespoły prądotwórcze o dużej mocy, gdyż statki te

posiadają wiele energochłonnych odbiorników takich jak np. stery strumieniowe (2–3-dziobowe oraz rufowe), w przypadku pędników gondolowych (azipod) stanowią one śrubostery zastępujące stery strumieniowe rufowe;

- cechą wyróżniającą statki pasażerskie spośród innych grup statków są rozbudowane instalacje parowe, z kotłami o dość dużych wydajnościach, zwykle dwa kotły opalane oraz liczba kotłów utylizacyjnych równa ilości silników spalinowych.

Określenie zapotrzebowania mocy do napędu statku

Do określenia mocy napędu głównego statku N_w wykorzystano wzór Admiralicji, w którym moc napędu jest funkcją wyporności D , prędkości pływania v oraz współczynnika Admiralicji c_x uwzględniającego cechy podobieństw geometrycznych kadłuba:

$$N_w = \frac{D^{2/3} v^3}{c_x} \quad (1)$$

Analizie poddano 30 statków. Korzystając ze wzoru (1), obliczono dla każdego i -tego statku z listy referencyjnej współczynnik c_x , który został następnie wykorzystany do obliczenia mocy napędu głównego N_{wi} każdego i -tego statku z listy, dla dziewięciu wybranych prędkości: 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 i 27 węzłów. Dla każdej tak określonej prędkości skonstruowano zbiorczy wykres zależności $N_w = f(D)$ dla całej populacji.

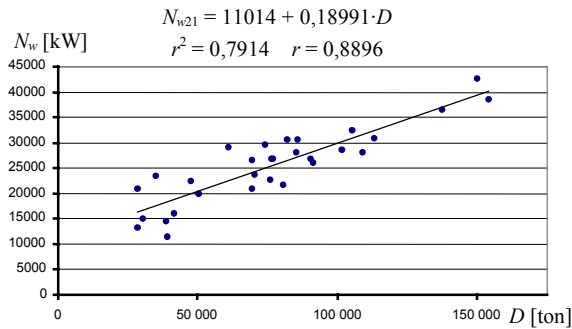
Obliczoną moc napędu głównego N_{wi} określa zależność liniowa:

$$N_w = a_0 + a_1 D \quad (2)$$

Obliczeń wartości współczynników a_{0i} oraz a_{1i} dla każdej z prędkości statku dokonano w oparciu o model regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów [5, 6, 7]. Otrzymano następujące zależności:

$$\left. \begin{array}{l} v = 27 \text{ w } N_{w27} = 23410 + 0,40362 D \\ v = 26 \text{ w } N_{w26} = 20904 + 0,36041 D \\ v = 25 \text{ w } N_{w25} = 18583 + 0,32041 D \\ v = 24 \text{ w } N_{w24} = 16441 + 0,28348 D \\ v = 23 \text{ w } N_{w23} = 14471 + 0,24950 D \\ v = 22 \text{ w } N_{w22} = 12664 + 0,21835 D \\ v = 21 \text{ w } N_{w21} = 11014 + 0,18991 D \\ v = 20 \text{ w } N_{w20} = 9515 + 0,16405 D \\ v = 19 \text{ w } N_{w19} = 8158 + 0,14065 D \end{array} \right\} \begin{array}{l} r^2 = 0,7914 \\ r = 0,8896 \end{array} \quad (3)$$

Przykład regresji liniowej dla $v = 21$ węzłów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład regresji liniowej określającej zależność $N_w = f(D)$ dla prędkości statku $v = 21$ węzłów
Fig. 2. An example of the linear regression determining the relation $N_w = f(D)$ for the ship's speed $v = 21$ knots

Współczynniki a_{0i} oraz a_{1i} tych funkcji są funkcjami prędkości statku:

$$\begin{aligned} a_0 &= f(v) \\ a_1 &= f(v) \end{aligned} \quad (4)$$

Dla określenia wartości tych współczynników w zależności od prędkości statku wykorzystano model aproksymacji funkcją potęgową typu:

$$y = a \cdot x^b \quad (5)$$

W omawianym przypadku przyjęto:

$$\begin{aligned} a_0 &= b_0 \cdot v^{a_0} \\ a_1 &= b_1 \cdot v^{a_1} \end{aligned}$$

Po obliczeniu współczynników regresji b_i oraz d_i , metodą najmniejszych kwadratów, funkcje (4) przyjęły postać:

$$\begin{aligned} a_0 &= f(v) = 1,1896 \cdot v^3 \\ a_1 &= f(v) = 0,00002051 \cdot v^3 \end{aligned}$$

Po podstawieniu ich do wzoru (2) otrzymano ostateczną postać równania określającego moc napędu głównego:

$$N_w = (1,1896 + 0,00002051 \cdot D) \cdot v^3 \quad (6)$$

gdzie:

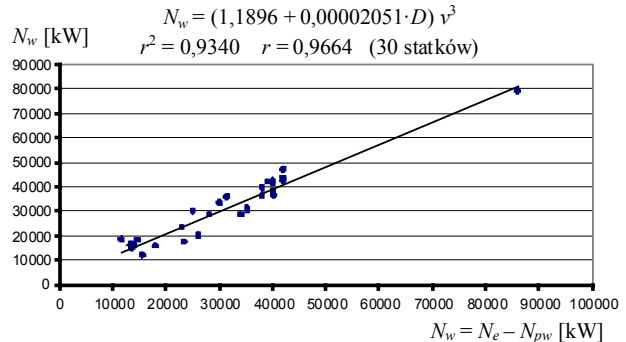
D [ton] – wyporność statku (ang. *gross tonnage*),
 v [węzły] – prędkość statku.

Obliczony współczynnik korelacji dla tak określonej funkcji w stosunku do danych zawartych w liście statków podobnych wynosi:

$$r = 0,9664$$

i świadczy o dużej zgodności obliczeń uzyskiwanych za pomocą funkcji (6) w stosunku do danych rzeczywistych i potwierdza poprawność przyjętych wcześniej założeń.

Korelacja pomiędzy mocą uzyskaną ze wzoru (6) a mocą głównego układu napędowego z listy statków podobnych obrazuje rysunek 3.



Rys. 3. Korelacja pomiędzy mocą uzyskaną ze wzoru (6) a mocą na wale głównego układu napędowego z listy statków podobnych

Fig. 3. Correlation between the power obtained from the formula (6) and the power on the shaft of the main propulsion system from the list of the reference ships

Określenie zapotrzebowania na łączną moc elektryczną

Na etapie projektu wstępnego siłowni statku niemożliwe jest precyzyjne określenie mocy elektrowni z uwagi na brak dokładnego bilansu elektrycznego statku. Stwarza to konieczność wzorowania się na już istniejących rozwiązaniach (lista statków podobnych) lub posługiwania się odpowiednimi zależnościami empirycznymi.

Statki pasażerskie z uwagi na duże i bardzo zróżnicowane zapotrzebowanie na energię elektryczną w różnych warunkach eksploatacyjnych posiadają w większości napęd diesel-elektryczny, ewentualnie układy COGES (*Radiance of the seas*, *Millenium*) oraz CODAG (*Queen Mary2*).

Jednymi z większych odbiorników energii elektrycznej są stery strumieniowe, których moc napędu zależy od wielkości statku, przeto przy określaniu zapotrzebowania na energię elektryczną dla nowoczesnych zbiornikowców przyjęto zasadę, że łączna zainstalowana moc elektrowni okrętowej jest przede wszystkim zależna od wyporności statku i ma charakter liniowy.

Do określenia zależności łącznej mocy elektrowni od mocy napędu głównego zastosowano model regresji liniowej, wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów. W wyniku obliczeń otrzymano następującą zależność:

$$\Sigma N_{el} = 3044 + 0,24048 \cdot D \quad (7)$$

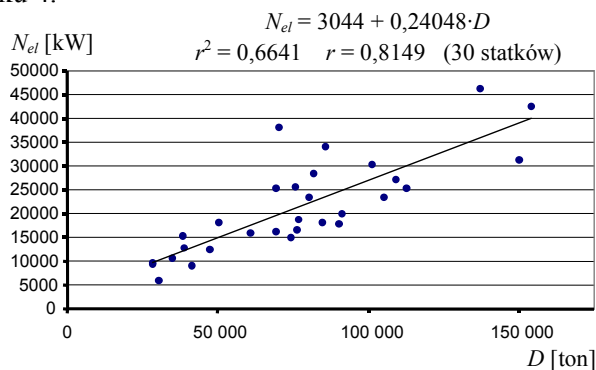
gdzie:

D [ton] – wyporność statku (*gross tonnage*).

Obliczony współczynnik korelacji wynosi:

$$r = 0,8149$$

Zależność pomiędzy łączną mocą elektryczną uzyskaną ze wzoru (7) a wypornością statków z listy statków podobnych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność pomiędzy łączną mocą elektryczną uzyskaną ze wzoru (7) a wypornością statków z listy referencyjnej
Fig. 4. Relation between the total electric power obtained from the formula (7) and displacement of the ships from the reference list

Określenie wydajności kotłów

Przy określaniu zapotrzebowania na parę grzewczą mamy do czynienia z podobnymi problemami, jakie występują przy określaniu zapotrzebowania na energię elektryczną, tzn. na etapie projektu wstępnego siłowni statku niemożliwe jest precyzyjne określenie wydajności kotłów z uwagi na brak dokładnego bilansu pary.

Na statkach pasażerskich stosowany jest dość rozbudowany w stosunku do innych typów statków układ kotłów o dużej wydajności. Zwykle są to dwa opalane kotły główne o znacznych wydajnościach oraz kotły pomocnicze ogrzewane spalinami silników głównych. Duża wydajność kotłów wynika z funkcji statku, tj. konieczności obsługi znacznej liczby pasażerów (potrzeb bytowych, sanitarnych, pralni itd.), a na największych statkach liczba miejsc dla pasażerów przekracza 4000 osób.

Z uwagi na fakt, że większa ilość kotłów to kotły utylizacyjne ogrzewane spalinami silników głównych, przyjęto zasadę, iż łączna wydajność kotłów jest zależna w głównym stopniu od mocy napędu głównego i ma charakter liniowy.

Do określenia zależności łącznej wydajności kotłów od mocy napędu głównego zastosowano model regresji liniowej, wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów. W wyniku obliczeń otrzymano następującą zależność:

$$D_{kmax} = -4763 + 1,15191 \cdot N_w \quad [kg/h] \quad (8)$$

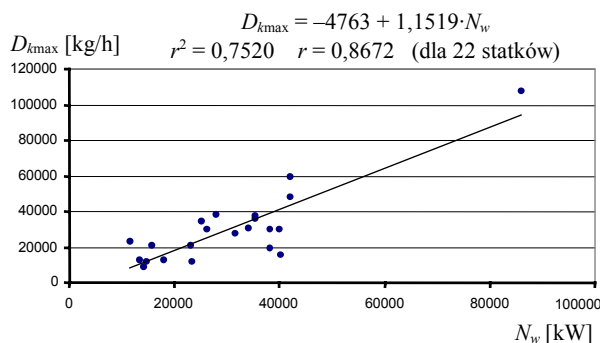
gdzie:

N_w [kW] – moc napędu głównego.

Obliczony współczynnik korelacji wynosi:

$$r = 0,8672$$

Zależność pomiędzy łączną wydajnością kotłów uzyskaną ze wzoru (8) a mocą na wale głównego układu napędowego z listy statków podobnych obrazuje rysunek 5.



Rys. 5. Zależność pomiędzy łączną wydajnością kotłów uzyskaną ze wzoru (8) a mocą głównego układu napędowego z listy referencyjnej

Fig. 5. Relation between the total boiler capacity obtained from the formula (8) and the power of the main propulsion system from the reference list

Ujemna wartość wyrazu wolnego wielomianu we wzorze (8) wynika z przyjęcia minimalnej mocy napędu głównego powyżej 10 000 kW.

Wnioski końcowe

Należy zwrócić uwagę na bardzo wysoki współczynnik korelacji uzyskany przy opracowaniu wzoru do określania mocy napędu głównego ($r > 0,9$) oraz nieco niższe wartości tych współczynników uzyskane przy określaniu łącznej mocy elektrycznej oraz łącznej wydajności kotłów na statkach pasażerskich. Wskazuje to na silny związek pomiędzy badanymi zależnościami.

Zaprezentowana w pracy metoda wykorzystująca opracowanie gotowych zależności, które w sposób szybki i prosty pozwalają z zadowalającą dokładnością określić zapotrzebowanie na energię dla projektowanej jednostki, może być przydatna biurom konstrukcyjnym oraz studentom przy obliczeniach projektowych, zwłaszcza na etapie projektu wstępnego, kiedy nie są jeszcze znane wyniki badań modelowych określających opór okrętu i w efekcie moc do napędu statku oraz odbiorniki energii elektrycznej i pary. Wysokie współczynniki korelacji pozwalają na zastosowanie tej metody z dużym prawdopodobieństwem, że wstępne obliczenia zbliżone będą wynikami do dokładnych obliczeń weryfikujących, uzyskanych na etapie projektu technicznego.

Autorzy opracowali już wzory do obliczeń mocy napędu głównego elektrowni oraz mocy cieplnej m.in. dla kontenerowców, masowców, statków ro-ro [4, 8, 9], jednak potrzebą staje się kompleksowe opracowanie wzorów dla pozostałych grup statków,

jako że istniejące dotąd wzory przybliżone [10, 11, 12] odnoszą się do statków starszej konstrukcji i nie znajdują zastosowania dla obecnie budowanych jednostek, charakteryzujących się rosnącym zapotrzebowaniem wszystkich rodzajów energii.

Bibliografia

1. GIERNALCZYK M., BALCERSKI A.: Probabilistic models for designing the sea-water pump systems of ship power plant. Part I. Polish Maritime Research 2000, 1(23), 7.
2. GIERNALCZYK M., BALCERSKI A.: Probabilistic models for designing the sea-water pump systems of ship power plant. Part II. Polish Maritime Research 2000, 2(24), 7.
3. RAPORT – Energetyczna ocena współczesnych siłowni okrętowych oraz kierunki działań zmierzające do poprawy ich efektywności. Projekt badawczy KBN nr 9 T12D 033 17 pod kierownictwem dr. hab. inż. Romualda Cwilewicza prof. nadzw. AM w Gdyni, Gdynia 2002.
4. GIERNALCZYK M., GÓRSKI Z.: Improvement in preliminary determination of energy demands for main propulsion, electric power and auxiliary boiler capacity by means of statistics as an example of modern ro-ro vessels. European Science Society of Power Train and Transport. Marine Technology Unit, Section of transport technical means of transport Committee of Polish Academy of Sciences. Journal of Polish CIMAC Explo-diesel & Gas turbine '07. V International Scientific-Technical Conference Gdańsk–Stokholm–Tumba 11–15 May 2007, 157–163.
5. DRAPER N. R., SMITH H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
6. Hewlett Packard: HP-65 Stat Pac 1, Cupertino, California, 1976.
7. ZIELIŃSKI R.: Tablice statystyczne. WNT, Warszawa 1978.
8. GIERNALCZYK M., GÓRSKI Z.: Method for determination of energy demand for main propulsion, electric power and heating purposes for modern container vessels by means of statistics, Polish Academy of Sciences, Branch Gdańsk, Marine Technology Transactions, 2004, 15, 363–370.
9. GIERNALCZYK M., GÓRSKI Z.: Improvement in the preliminary determination of energy demands for main propulsion, electric power and auxiliary boiler capacity by means of statistic: an example based on modern bulk carriers. 9th Baltic Region Seminar on Engineering Education, Maritime University, Gdynia, 17–20 June 2005, 49–51.
10. MICHALSKI R.: Siłownie okrętowe. Obliczenia wstępne oraz ogólne zasady doboru mechanizmów i urządzeń pomocniczych instalacji siłowni motorowych. Politechnika Szczecińska, Szczecin 1997.
11. Ujednolicone metody obliczeń instalacji siłowni spalinyowych. Opracowanie CTO. Gdańsk 1974.
12. Unifikacja siłowni. Część V. Elektrownia. Opracowanie CTO. Gdańsk 1978.

Recenzent:

*dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM
Akademia Morska w Szczecinie*