ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 10(82)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

IV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
EXPLO-SHIP 2006

Mariusz Giernalczyk, Zygmunt Górski

Metoda określania zapotrzebowania energii do napędu statku, energii elektrycznej i wydajności kotłów dla nowoczesnych zbiornikowców do przewozu ropy naftowej i jej produktów przy wykorzystaniu metod statystycznych

Słowa kluczowe: zbiornikowiec, ropa naftowa, napęd główny, kotły, elektrownia

W artykule przedstawiono oryginalną metodę określania zapotrzebowania energii do napędu statku, energii elektrycznej oraz wydajności kotłów dla nowoczesnych zbiornikowców do przewozu ropy naftowej i jej produktów, na etapie wstępnego projektowania statku, przy wykorzystaniu metod statystycznych.

A Statistics-based Method for the Determination of Energy Demand for Main Propulsion, Electric Power Production and Boiler Capacities for Modern Crude Oil and Products Tankers

Keywords: crude oil tanker, product tanker, main propulsion, electric power, boilers

This article presents a method of estimating main propulsion power, electrical power and boiler capacities of modern crude oil and products tankers using statistic methods of calculations.

Wstęp

Istnieje szereg metod, pozwalających w sposób przybliżony określić zapotrzebowanie na energię mechaniczną, elektryczną i cieplną dla statku. Przykładowo: wstępne określenie energii do napędu statku można wykonać metodami Papmiela, Guldhammera-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 potrzebne 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. W tym celu sporządzono „listę statków podobnych" (listę referencyjną), w której zamieszczono podstawowe parametry konstrukcyjne wybranych nowoczesnych zbiornikowców do przewozu ropy naftowej i jej produktów, zbudowanych w ostatnich latach lub budowanych aktualnie w stoczniach krajowych i zagranicznych. Spośród parametrów konstrukcyjnych statków w zestawionych listach zamieszczono te, które w sposób logiczny i funkcjonalny wiążą się z zapotrzebowaniem na energię do napędu statku i energię elektryczną oraz z wydajnością kotłów. Wytypowane do „listy statków podobnych" jednostki pochodzą głównie z opracowań *The Royal Institution of Naval Architects*, skupiającego najwybitniejszych przedstawicieli z dziedziny gospodarki morskiej z całego świata, zamieszczającego 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.

Zbiornikowce to statki przeznaczone do transportu materiałów płynnych, należące do największych statków handlowych. Ładunek przewożony jest w zbiornikach, których załadunek i wyładunek odbywa się za pośrednictwem systemu rurociągów i pomp. Zbiornikowce najpowszechniej wykorzystywane są do transportu ropy naftowej oraz jej produktów, a także chemikaliów (chemikaliowce) i skroplonego gazu (gazowce LNG oraz LPG). Do grupy zbiornikowców zalicza się też tzw. statki kombinowane, tj. ropo-rudo-masowce (OBO), czy ropo-rudo-kontenerowce (COB). Od pewnego czasu zbiornikowce budowane są w systemie double-hull (dwuposzyciowy kadłub), mający na celu zmniejszenie ryzyka ewentualnych wycieków przy rozszczelnieniu kadłuba (kolizja, wejście na mieliznę).

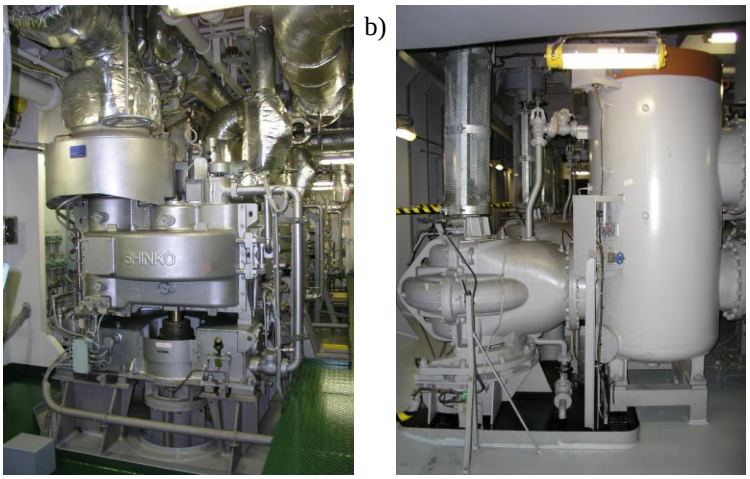
Przedmiotem niniejszej analizy są statki do przewozu ropy naftowej oraz statki do przewozu jej produktów. Ze względu na właściwości przewożonego ładunku (gęstość i lepkość), występują pewne różnice w głównych układach

energetycznych dwóch podstawowych grup zbiornikowców – dotyczące głównie wydajności kotłów oraz wielkości elektrowni. Wynika to przede wszystkim z różnych konfiguracji pomp ładunkowych. Zbiornikowce do przewozu ropy naftowej posiadają najczęściej trzy lub cztery duże pompy ładunkowe napędzane turbinami parowymi (stąd duże zapotrzebowanie na parę i duże wydajności kotłów), natomiast na produktowcach stosowne są często indywidualne dla każdego zbiornika pompy ładunkowe, napędzane silnikami hydraulicznymi bądź elektrycznymi (występuje więc większe zapotrzebowanie na energię elektryczną). Uwzględniając te okoliczności dokonano rozdziału obu tych grup statków, zwłaszcza przy określaniu wydajności kotłów i zapotrzebowania na energię elektryczną, i przeprowadzono dla nich oddzielne analizy statystyczne.

Ze wstępnej analizy „listy statków podobnych" wynika, iż:

- silniki napędu głównego tych jednostek stanowią głównie wolnoobrotowe silniki spalinowe, prędkości osiągane przez zbiornikowce wynoszą ok. 14 – 15 węzłów;
- elektrownię tworzą najczęściej trzy spalinowe zespoły prądotwórcze, o nienajwiększej mocy, gdyż statki te nie posiadają takich energochłonnych odbiorników jak stery strumieniowe, jedynie na niektórych produktowcach posiadających indywidualne pompy ładunkowe występuje większe zapotrzebowanie na energię elektryczną;
- cechą wyróżniającą zbiornikowce spośród innych grup statków są rozbudowane instalacje parowe, z kotłami o bardzo dużych wydajnościach.

a) b)



Rys. 1. Widok pomp ładunkowych na zbiornikowcu do przewozu ropy naftowej: a) widok turbiny napędzającej; b) widok pompy ładunkowej

Fig. 1. View of crude oil tanker's cargo pumps: a) driving turbine, b) cargo pump

Wynika to z konieczności napędu pomp ładunkowych o znacznych wydajnościach (3000 – 5000 m^3/h każda). Widok takiej grupy pomp pokazuje rysunek 1. Dodatkowo na produktowcach znaczna ilość pary potrzebna jest do grzania ładunku płynnego.

1. Określenie zapotrzebowania mocy do napędu statku

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

$$N_w = \frac{D^{\frac{2}{3}} V^3}{c_x} \tag{1}$$

Analizie poddano 63 statki. 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 siedmiu wybranych prędkości: 12, 13, 14, 15, 16, 17 i 18 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:

$$N_w = a_0 + a_1 D \tag{2}$$

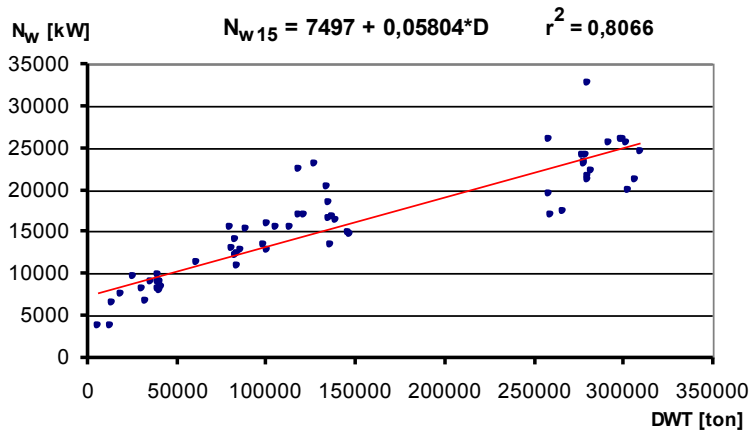
Obliczeń wartości współczynników a_{0i} oraz a_{1i} dla każdej z prędkości statku dokonano w oparciu o model regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów. Otrzymano następujące zależności:

$$\text{dla:}\quad \left.\begin{array}{ll} v = 18\text{ w} & N_{w18} = 12955 + 0{,}10030\ D \\ v = 17\text{ w} & N_{w17} = 10914 + 0{,}08449\ D \\ v = 16\text{ w} & N_{w16} = 9099 + 0{,}07044\ D \\ v = 15\text{ w} & N_{w15} = 7497 + 0{,}05804\ D \\ v = 14\text{ w} & N_{w14} = 6096 + 0{,}04719\ D \\ v = 13\text{ w} & N_{w13} = 4881 + 0{,}03778\ D \\ v = 12\text{ w} & N_{w12} = 3839 + 0{,}02972\ D \end{array}\right\} r^2 = 0{,}8066,\ \ r = 0{,}8981 \tag{3}$$

Przykład regresji liniowej dla $v = 15$ węzłów przedstawia rysunek 2.

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

$$a_0 = f(v), \qquad a_1 = f(v) \tag{4}$$



Rys. 2. Przykład regresji liniowej określającej zależność $N_w = f(D)$ dla prędkości statku $v = 15$ węzłów

Fig. 2. Linear regression of the relationship N_w=f(D) for a speed of 15 knots

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

$$y = a\,x^b \tag{5}$$

W omawianym przypadku przyjęto:

$$a_0 = b_0\,v^{d0} \qquad a_1 = b_1\,v^{d1}$$

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

$$a_0 = f(v) = 2{,}2215 \cdot v^3 \qquad a_1 = f(v) = 0{,}0000172 \cdot v^3$$

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

$$N_w = (2{,}2215 + 0{,}0000172 \cdot D) \cdot v^3 \text{ [kW]} \tag{6}$$

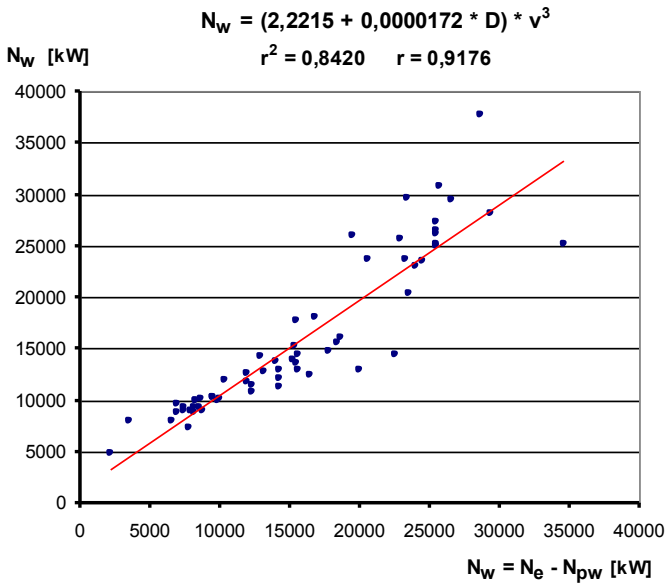
gdzie:

D – DWT nośność statku [ton],

v – prędkość statku [węzły].

Obliczony współczynnik korelacji dla tak określonej funkcji, w stosunku do danych zawartych w liście statków podobnych [6], wynosi: $r = 0{,}9176$ i świadczy o dużej zgodności obliczeń uzyskiwanych przy pomocy otrzymanej funkcji (6) w stosunku do danych rzeczywistych, co potwierdza poprawność przyjętych wcześniej założeń.

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



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

Fig. 3. The correlation between the main propulsion power obtained according to the formula (6) and information taken from the reference list

2. 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. Jednak dostępne wzory odnoszą się do statków starszej konstrukcji i nie uwzględniają szeregu elementów, które pojawiły się wraz z rozwojem nowych konstrukcji zbiornikowców. Stwarzało to konieczność opracowania nowych wzorów, uwzględniających powyższe zmiany.

Analizie statystycznej poddano 33 jednostki (26 statków do przewozu ropy naftowej oraz 7 produktowców) uwzględniając tylko te, które posiadały pompy ładunkowe napędzane turbinami parowymi, gdyż układy z pompami indywidualnymi napędzanymi hydraulicznie bądź elektrycznie charakteryzowały się innym zapotrzebowaniem na energię elektryczną (zwiększony pobór energii przez tego typu pompy).

Przy określaniu zapotrzebowania na energię elektryczną dla nowoczesnych zbiornikowców przyjęto zasadę [7, 9], że łączna zainstalowana moc elektrowni okrętowej jest silnie zależna od mocy napędu głównego 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:

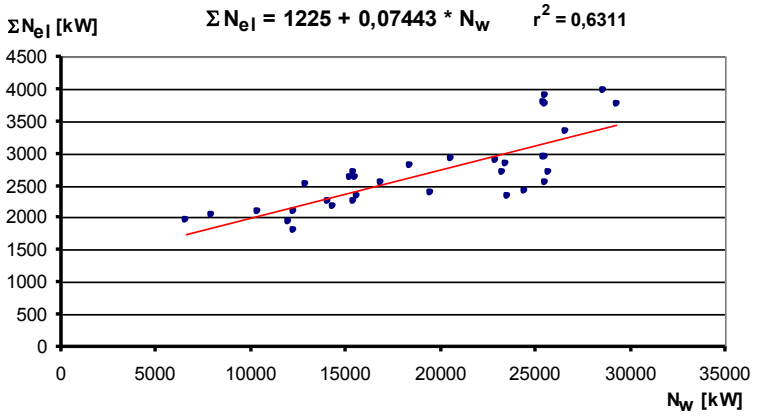
$$\Sigma N_{el} = 1225 + 0{,}07443 \cdot N_w \text{ [kW]} \tag{7}$$

gdzie:

N_w – moc na wale napędu głównego [kW].

Obliczony współczynnik korelacji wynosi: $r = 0{,}7944$.

Zależność pomiędzy łączną mocą elektryczną uzyskaną ze wzoru (7) a mocą na wale głównego układu napędowego z listy statków podobnych przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Zależność pomiędzy łączną mocą elektryczną uzyskaną ze wzoru (7) a mocą na wale głównego układu napędowego z listy referencyjnej

Fig. 4. Linear regression for the determination of total electric power obtained according to the formula (7) as the function of the main propulsion power

3. 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 zbiornikowcach stosowany jest, rozbudowany w stosunku do innych typów statków, układ kotłów o bardzo dużej wydajności. Zwykle są to dwa opalane kotły główne o dużej wydajności oraz kocioł pomocniczy ogrzewany spalinami silnika głównego. Kotły główne m.in. pokrywają znaczne zapotrzebowanie na parę potrzebną do napędu turbin pomp ładunkowych. Dlatego należy ze

szczególną starannością prowadzić analizę i z tej przyczyny analizie statystycznej poddano grupę 39 statków (32 statki do przewozu ropy naftowej oraz 7 produktowców), uwzględniając tylko te jednostki, które posiadały pompy ładunkowe napędzane turbinami parowymi, gdyż układy z pompami indywidualnymi napędzanymi hydraulicznie bądź elektrycznie charakteryzowały się znacznie mniejszym zapotrzebowaniem na parę grzewczą.

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku określania zapotrzebowania na energię elektryczną przyjęto zasadę, że łączna wydajność kotłów jest zależna w największym stopniu od mocy napędu głównego i ma charakter liniowy.

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

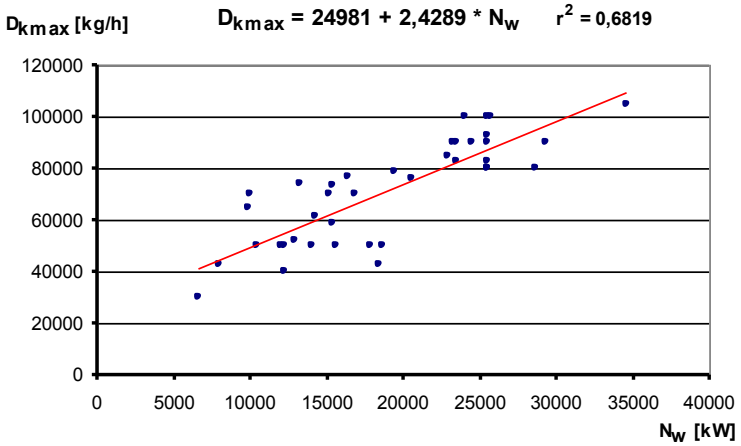
$$D_{kmax} = 24981 + 2{,}4289 \cdot N_w \quad \text{[kg/h]} \tag{8}$$

gdzie:

N_w – moc na wale napędu głównego [kW].

Obliczony współczynnik korelacji wynosi: $r = 0{,}8258$.

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



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

Fig. 5. Linear regression for the determination of boiler capacities obtained according to the formula (8) as the function of the main propulsion power

Wnioski

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 zbiornikowcach. Wskazuje to na silny związek pomiędzy badanymi zależnościami. Istnieje konieczność prowadzenia dodatkowych analiz statystycznych dla statków z różnymi typami pomp ładunkowych oraz oddzielnych dla statków posiadających układy dynamicznego pozycjonowania, charakteryzujących się bardzo dużym zapotrzebowaniem na energię elektryczną i posiadających z reguły układy napędowe diesel-elektryczne.

Zaprezentowana w pracy metoda pozwala na opracowanie gotowych zależności, które w sposób szybki i prosty pomogą z zadowalającą dokładnością określić zapotrzebowanie na energię dla projektowanej jednostki. Metoda może być przydatna biurom konstrukcyjnym oraz studentom przy obliczeniach projektowych, zwłaszcza na etapie projektu wstępnego, kiedy nie są jeszcze znane wyniki badań modelowych pozwalające określić 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.

Ponadto potrzebą staje się kompleksowe opracowanie wzorów dla pozostałych grup statków (gazowce, chemikaliowce, statki pasażerskie i inne) jako, że istniejące dotąd wzory przybliżone odnoszą się do statków starszej konstrukcji i nie znajdują zastosowania dla obecnie budowanych jednostek, charakteryzujących się rosnącym zapotrzebowaniem na wszystkie rodzaje energii.

Literatura

1. Draper N. R., Smith H., *Analiza regresji stosowana*, Warszawa 1973.
2. Giernalczyk M., Balcerski A., *Probabilistic models for designing the seawater pump systems of ship power plant, Part I*, Polish Maritime Research, No 1(23) March 2000, Vol. 7.
3. Giernalczyk M., Balcerski A., *Probabilistic models for designing the seawater pump systems of ship power plant. Part II*, Polish Maritime Research, No 2(24) June 2000, Vol. 7.
4. 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, Vol. 15, 2004, pp. 363 – 370. Special issue-XXI SNO.
5. 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, Gdynia Maritime University, 17 – 20 June 2005, pp 49 – 51.
6. Hewlett Packard, HP-65 Stat Pac 1, Cupertino, California, March 1976.
7. Michalski R., *Siłownie okrętowe. Obliczenia wstępne oraz ogólne zasady doboru mechanizmów i urządzeń pomocniczych instalacji siłowni motorowych*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1997.
8. 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.
9. *Ujednolicone metody obliczeń instalacji siłowni spalinowych*, Opracowanie CTO, Gdańsk 1974.
10. *Unifikacja siłowni. Część V. Elektrownia*, Opracowanie CTO, Gdańsk 1978.
11. Zieliński R., *Tablice statystyczne*, WNT, Warszawa 1978.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2006 r.

Recenzent

dr hab. inż. Cezary Behrendt, prof. AM

Adresy Autorów

dr inż. of. mech. okr. III kl. Mariusz Giernalczyk
dr inż. st. of. mech. okr. Zygmunt Górski, prof. AM
Akademia Morska w Gdyni
Katedra Siłowni Okrętowych
81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87