



# **METODA POŚREDNIEGO WYZNACZANIA MOCY EFEKTYWNEJ WOLNOOBROTOWEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO NA PODSTAWIE EKSPLOATACYJNYCH POMIARÓW CIŚNIENIA POWIETRZA DOŁADOWUJĄCEGO**

**Dominik Kreft**

*Politechnika Gdańska,  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,  
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel: +48 58 3472374,  
e-mail: [dominik.kreft@pg.edu.pl](mailto:dominik.kreft@pg.edu.pl)*

## **Streszczenie**

*W artykule przedstawiono metodę, która pozwala w przybliżony sposób wyznaczyć względną moc okrętowego silnika głównego w warunkach eksploatacji na podstawie standardowego pomiaru ciśnienia powietrza doładowującego w kanale dolotowym. Metoda oparta jest na określaniu współczynników aproksymującej funkcji liniowej, przy znanym ciśnieniu doładowania oraz rodzaju i mocy nominalnej silnika. Jest ona uzupełnieniem innych metod pośredniego wyznaczania mocy efektywnej silnika głównego, wymienionych we wstępie niniejszego artykułu.*

**Słowa kluczowe:** silnik okrętowy, moc efektywna, ciśnienie doładowania, pomiary eksploatacyjne.

## **1. Wstęp**

Podczas rejsu statku, wartości różnych parametrów w siłowni okrętowej odnotowywane są przez załogę w dzienniku maszynowym lub zbierane automatycznie przez system informatyczny, zespolony z silnikiem napędowym. Zapisywane dane eksploatacyjne mogą różnić się w zależności od wewnętrznych przepisów danego armatora, ale są to najczęściej odnotowywane raz na dobę:

- data i czas z wyróżnieniem stanu eksploatacyjnego statku (np. 10h postój w porcie, 14h pływanie swobodne),
- dane nautyczne: przepłynięty dystans, prędkość i kierunek prądu morskiego oraz wiatru,
- prędkość obrotowa silnika napędowego,
- ciśnienia: powietrza doładowującego, wody słodkiej i oleju smarowego w obiegach silnika głównego,
- temperatury: spalin przed i za turbosprężarką, powietrza doładowującego, wody morskiej na wlotach i wylotach z chłodnic centralnych (lub oleju smarowego i wody cylindrowej), powietrza zewnętrznego,

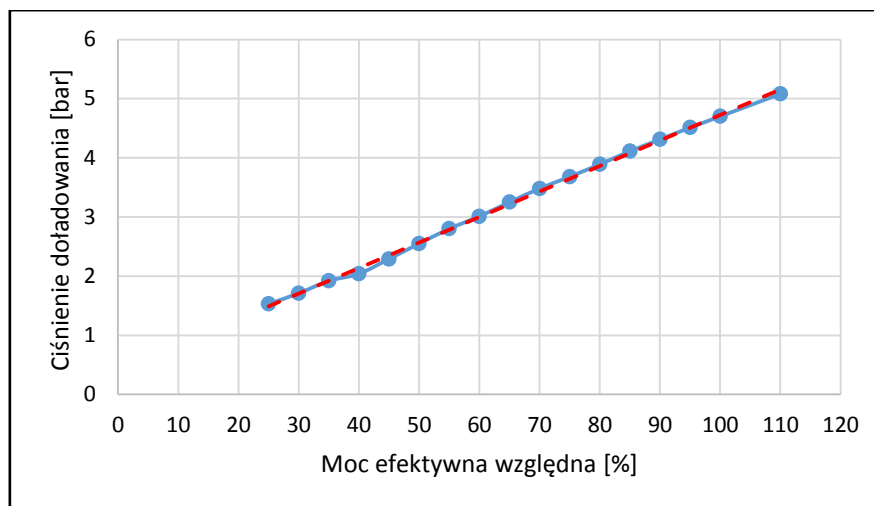
- czas pracy poszczególnych zespołów prądotwórczych oraz kotła opalanego,
- średnia dobową moc elektryczną poszczególnych zespołów prądotwórczych oraz prądnicy wałowej,
- zużycie oleju smarującego silnik główny i zespoły prądotwórcze,
- zużycie paliwa z podziałem na poszczególne silniki i kotły, rodzaj paliwa i stan eksploatacyjny statku,
- ilość paliwa w zbiornikach zapasowych z podziałem na jego rodzaj wraz z adnotacjami o dacie, miejscu i objętości bunkrowanego paliwa [4].

Powyższe dane nie zawierają bezpośredniej informacji na temat średniej dobowej mocy efektywnej silnika głównego w czasie eksploatacji. Najpopularniejszą metodą obliczania powyższej mocy jest pomiar prędkości obrotowej za pomocą obrotomierza oraz momentu obrotowego na wale napędowym za pomocą momentomierza tensometrycznego lub impulsowego. Możliwe jest obliczenie tej wartości na podstawie pomiaru zużycia paliwa przy znajomości jego wartości opałowej oraz zależności jednostkowego zużycia paliwa od mocy efektywnej która jest udostępniana przez producentów silników. Niestety metoda ta jest niedokładna ze względu na obarczony błędem pomiar zużycia paliwa, określenie jego gęstości i wartości opałowej [1, 5]. Ponadto należy wspomnieć o pośrednich metodach obliczania mocy efektywnej, bazujących na funkcji iloczynu prędkości obrotowej turbosprężarki oraz temperaturze spalin na jej wylocie z uwzględnieniem położenia wskaźnika obciążenia [1, 2]. Jest też możliwe obliczenie mocy efektywnej przy znajomości współczynnika nadmiaru powietrza oraz porównaniu masowego strumienia spalin w funkcji mocy użytecznej. Wszystkie powyższe metody, które opierają się na danych zawartych w dziennikach maszynowych, bazują na charakterystykach określonych przez producenta silnika podczas prób nowego silnika na hamowni. W trakcie eksploatacji warunki mogą znacznie odbiegać od warunków teoretycznych, co powoduje błąd, który Man B&W określa na 6% w przypadku zużycia paliwa przez silnik główny, 5% dla agregatów prądotwórczych, zaś dla spalin wylotowych dokładność wartości temperatury wynosi +/- 15°C a masowego natężenia przepływu +/-5% [5, 6].

Celem niniejszego artykułu jest zaproponowanie alternatywnej metody wyznaczania mocy efektywnej silnika głównego bazując na eksploatacyjnych pomiarach ciśnienia powietrza doładowującego.

## 2. Sprawdzenie liniowości funkcji

Wyższe ciśnienie doładowania umożliwia całkowite spalanie większej dawki paliwa. W konsekwencji moc efektywna silnika spalinowego rośnie wraz z ciśnieniem doładowania. W przypadku silników dwusuwowych WinGD, wykres zależności ciśnienia doładowania od mocy efektywnej jest zbliżony do funkcji liniowej [8]. Przykładowy wykres dla silnika WinGD W12X92, wraz z czerwoną przerwana linią trendu przedstawiono na Rys. 1:



Rys. 1. Zależność ciśnienia doładowania od mocy efektywnej (w wartościach względnych) dla silnika WinGD typu W12X92

Kwadrat współczynnika korelacji iloczynu momentów Pearsona  $R^2$  (współczynnik determinacji) który jest stosunkiem kwadratów wariancji ciśnienia do wariancji mocy efektywnej dla liniowej funkcji trendu wynosi 0,9985 [3]. Przy  $n = 17$  wartościach, funkcja posiada 15 stopni swobody, a wartość krytyczna dla poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  wynosi 0,606 [7]. Współczynnik korelacji jest wyższy od wartości krytycznej testu statystycznego, więc można przyjąć hipotezę alternatywną, że funkcja pierwotna oraz liniowa funkcja trendu są dobrze skorelowane.

### 3. Określenie zależności efektywnej mocy silnika w funkcji ciśnienia doładowania

W celu określenia zależności mocy efektywnej silnika od ciśnienia doładowania, zostanie obliczony współczynnik kierunkowy  $a$  oraz wyraz wolny  $b$  układu równań liniowych w następującej postaci:

$$\begin{cases} p_{d1} = a \cdot P_{e1} + b \\ p_{d2} = a \cdot P_{e2} + b \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$P_e$  - względna moc efektywna silnika [%]

$p_d$  - ciśnienie powietrza doładowującego [bar]

Współczynniki  $a$  i  $b$  układu równań (1) zostały obliczone i przedstawione w Tab. 1 dla wszystkich jednopaliwowych silników dwusuwowych firmy WinGD, przy założeniu maksymalnej liczby cylindrów oferowanej dla danego silnika oraz maksymalnej mocy i prędkości obrotowej. W dolnej części tabeli została obliczona średnia arytmetyczna oraz odchylenie standardowe współczynnika  $a$  i wyrazu wolnego  $b$ . Po analizie danych silników WinGD stwierdzono, że ciśnienie doładowania zależy od rodzaju silnika i jego mocy nominalnej, natomiast nie ma na nie wpływu konstrukcja turbosprężarki [8].

Tab. 1 Zestawienie współczynników funkcji liniowej dla jednopaliwowych silników firmy WinGD

Rodzaj silnika	Moc nominalna [kW]	Współczynnik a	Współczynnik b
8RT-flex48T-D	12804	0,0353	0,5876
8RT-flex50-D	15356	0,0409	0,5265
8RT-flex58T-D	19888	0,0385	0,5582
W8X35-B	7656	0,0411	0,5435
W8X40-B	9988	0,0401	0,6771
W8X52	15928	0,0409	0,5765
W8X62	23408	0,0389	0,5565
W8X72	31768	0,0389	0,5565
W9X82-D	54450	0,0381	0,8171
W12X92	85140	0,0418	0,4859
<b>średnia arytmetyczna <math>\mu</math></b>		<b>0,0395</b>	<b>0,5885</b>
<b>odchylenie standardowe <math>\sigma</math></b>		<b>0,0018</b>	<b>0,0892</b>

Po przekształceniu wzoru (1) i podstawieniu średnich arytmetycznych wartości współczynników a i b wyliczonych w Tab. 1, uniwersalny wzór (2) na względną moc efektywną, silnika przy znanym ciśnieniu powietrza doładowującego można zapisać w postaci:

$$P_e = \frac{p_d - 0,5885}{0,0395} [\%] \quad (2)$$

W celu oszacowania błędu mocy efektywnej silnika uzyskanego z powyższego wzoru oraz założeniu normalności rozkładu współczynników a i b, zostanie obliczony błąd standardowy, dający pewność, że w przedziale  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  znajduje się 68,3% wszystkich obserwacji [3]. Zastosowanie błędu standardowego podyktowane jest brakiem potrzeby dokładniejszego określania błędu (np. według reguły  $3\sigma$ ), z racji tego, że metoda ma służyć jedynie oszacowaniu wartości mocy efektywnej silnika głównego. W takim razie można zapisać:

$$P_e = \frac{p_d - 0,5885 + /-0,0892}{0,0395 + /-0,0018} [\%] \quad (3)$$

Co dla ciśnienia 2 bar wynosi:

$$P_e = 35,77_{-3,74}^{+4,11} [\%] \quad (4)$$

a dla ciśnienia 4 bar:

$$P_e = 86,46_{-5,99}^{+6,57} [\%] \quad (5)$$

Na podstawie powyższych wzorów można stwierdzić, że dokładność oszacowania mocy efektywnej silnika spada wraz ze wzrostem ciśnienia doładowania. Średni błąd standardowy dla ciśnień doładowania w zakresie 1,5 - 4,7 bar wynosi, odpowiednio: + 5,46 % oraz - 4,98 % mocy efektywnej silnika.

#### 4. Przykład obliczeniowy

Do przykładu obliczeniowego wybrano silnik: WinGD 6W-X52 o mocy nominalnej 9000 kW oraz prędkości obrotowej 90 obr/min, wyposażony w jedną turbosprężarkę ABB A265-L.

W oprogramowaniu WinGD – General Technical Data (GTD) [8], w zakładce *Result* należy wygenerować arkusz kalkulacyjny Excel, zawierający najważniejszą informację dotyczącą silnika.

Następnie w arkuszu kalkulacyjnym z zakładki *Performance tables* należy odczytać wartości ciśnienia doładowania dla 25 i 100% obciążenia eksploatacyjnego, które wynoszą, odpowiednio: 1,6 i 4,96 bar. Odczytane wartości należy podstawić do układu równań liniowych:

$$\begin{cases} 1,6 = a \cdot 25 + b \\ 4,96 = a \cdot 110 + b \end{cases} \quad (6)$$

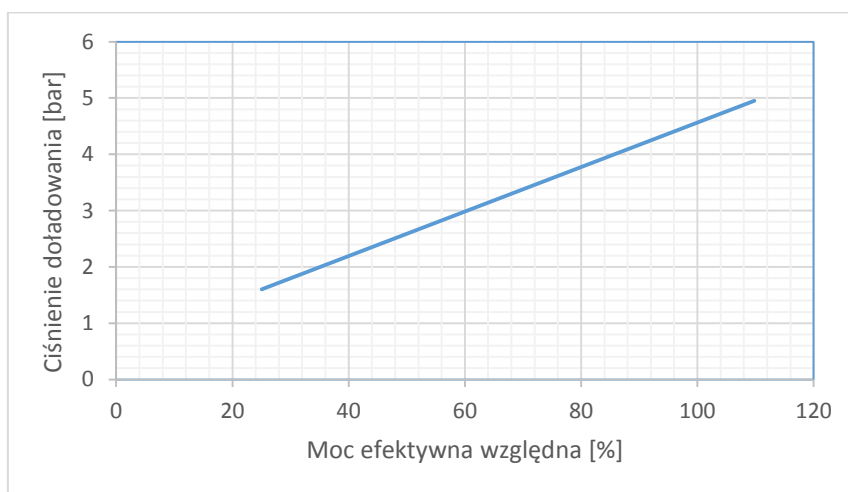
Po rozwiązaniu układu równań otrzymujemy wynik w postaci:

$$\begin{cases} a = 0,0395 \\ b = 0,6118 \end{cases}$$

Więc równanie do obliczenia mocy efektywnej silnika przyjmie następującą postać:

$$P_{load} = \frac{p_d - 0,6118}{0,0395} [\%] \quad (7)$$

Ostatecznie zależność można przedstawić na wykresie pokazanym na Rys. 2.



Rys. 2 Zależność ciśnienia doładowania od mocy efektywnej (w wartościach względnych) dla silnika WinGD typu 6WX52 o mocy nominalnej 9000 kW oraz prędkości obrotowej 90 obr/min

## 5. Podsumowanie

W pracy została zaproponowana metoda, która jest uzupełnieniem znanych metod określania mocy efektywnej silnika w eksploatacji. Została określona zależność empiryczna pozwalająca na szybkie oszacowanie mocy efektywnej silników głównych dla określonego typoszeregu firmy WinGD na podstawie eksploatacyjnych pomiarów ciśnienia doładowania. Zaletą metody jest jej niewątpliwa prostota. Jako wadę należy uznać nadmierną niedokładność uzyskiwanych wyników wynoszącą w przybliżeniu 5% (dla 68% poziomu ufności). Z tego względu można ją stosować tylko w celu wstępnego oszacowania mocy efektywnej silnika w warunkach eksploatacji. W celu uzyskania dokładniejszej wartości wyznaczonej mocy należy skorzystać ze współczynników funkcji liniowej dla konkretnego typu silnika przedstawionych w Tab. 1 (oraz uwzględnić jego moc), lub samodzielnie obliczyć współczynniki w oparciu o dane pomiarowe udostępniane przez producenta. Należy również dokładnie przeanalizować oddziaływanie zakłóceń zewnętrznych, układu regulacji i sterowania silnika oraz zmiany jego stanu technicznego w procesie eksploatacji.

## 6. Bibliografia

- [1] Balcerski A., *Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji spalinowych siłowni okrętowych*, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007.
- [2] Balcerski, A., *Metody pośredniego określania mocy okrętowych tłokowych silników spalinowych napędu głównego*, Technika i Gospodarka Morska, Gdańsk 1988.
- [3] Starzyńska, W., *Statystyka praktyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [4] Log Abstracts, “*Valdivia, Balbina, Blandine, AAL Gladstone*”
- [5] MAN B&W, “*CEAS Engine Calculations*”, online 20.11.2019, <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>
- [6] Project Guide, “*MAN B & W S60ME-C10.5-TIP*”, Kopenhaga 2017.
- [7] Statistic Solutions, “*Table of Critical Values: Pearson Correlation*” online 20.11.2019, <https://www.statisticssolutions.com/table-of-critical-values-pearson-correlation>
- [8] Win GD, “*GTD 2.7.0.0*”, online 20.11.2019, [https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-\(gtd\)/](https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-(gtd)/)