

## Eksplatacyjne obciążenia śrub napędowych pogłębiarek różnych typów w podstawowych stanach ich eksploatacji

### Operational loads of propellers of different dredgers types in main service states

Damian Bocheński

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Katedra Siłowni Okrętowych  
80-952 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11–12, e-mail: daboch@pg.gda.pl

**Słowa kluczowe:** pogłębiarki ssące nasiębiernie, pogłębiarki wieloczerpakowe, śruby napędowe

#### Abstrakt

Artykuł przedstawia wyniki badań eksploatacyjnych dotyczących jednego z najważniejszych odbiorników energii mechanicznej na pogłębiarkach: śrub napędowych. Badania eksploatacyjne obejmowały pomiary parametrów charakteryzujących obciążenia śrub napędowych pogłębiarek w dwóch podstawowych stanach ich eksploatacji: robotach pogłębiarskich i pływaniu swobodnym. Przedstawione w pracy wyniki obejmują 10 pogłębiarek, w tym 8 pogłębiarek ssących nasiębiernych i 2 pogłębiarki wieloczerpakowe. Scharakteryzowano rozkłady obciążeń śrub napędowych, biorąc pod uwagę m.in. wartości średnie, odchylenie standardowe i współczynniki zmienności rozkładu obciążeń. Przedstawiono przykładowe histogramy obciążeń śrub na wybranych pogłębiarkach w badanych okresach czasu. Sformułowano wnioski odnośnie wartości średnich obciążeń śrub oraz współczynników zmienności rozkładu obciążeń. Wyniki przedstawione w pracy będą wykorzystane przy tworzeniu modeli losowych opisujących rzeczywiste warunki eksploatacji elementów układów energetycznych pogłębiarek.

**Key words:** trailing suction hopper dredgers, bucket ladder dredgers, propellers

#### Abstract

The article presents results of operation investigations regarding one of the most important receivers of mechanical energy on dredgers: propellers. Operation investigations covered measurements of characteristic parameters of loading propellers on dredgers in two basic conditions of their work: dredging works and sailing at sea. Presented results are based on 10 dredgers (8 trailing suction hopper dredgers and 2 bucket dredgers). In the paper characteristics of spread of propellers loading, i.e. average value, standard deviation and coefficients of variations of loading spread are presented. Examples of load distribution propellers on chosen dredgers during some period of time are shown as well. Conclusions are formulated regarding average value of propellers loading and coefficients of variations of loading spread. Results presented in the paper will be used as a base for creation of random models describing real conditions of operation of dredgers' power plants.

#### Wstęp

Śruby napędowe należą do grupy najważniejszych odbiorników energii mechanicznej na pogłębiarkach. Występują na wielu typach pogłębiarek, np. ssących nasiębiernych, czasami na pogłębiarkach frezująco-ssących, wieloczerpakowych czy chwytakowych [1].

Na pogłębiarkach ssących nasiębiernych śruby napędowe wykorzystywane są zarówno w czasie

stanu zwanego pływaniem swobodnym (jazdą w morzu), jak również podczas prowadzenia robót pogłębiarskich. Najczęściej (około 98%, na podstawie bazy danych DRAGA [2]) występują one w układzie dwuśrubowym. Śruby napędowe z reguły są śrubami o skoku nastawnym i bardzo często w dyszy. Wynika to z warunków eksploatacji pogłębiarek ssących nasiębiernych, jak i z rozwiązań ich układów energetycznych [3]. Moc śrub napę-

dowych na tych pogłębiarkach zależy przede wszystkim od wielkości pogłębiarki i założonych prędkości pływania. Zawiera się w szerokim przedziale od kilkuset do blisko 26 000 kW [2].

Śruby napędowe występują na mniej więcej co szóstą pogłębiarkę frezująco-ssącą i wieloczerpakowej. Na tego typu pogłębiarkach są to najczęściej śruby o skoku ustalonym bez dyszy. Liczba śrub to jedna – dwie, przy czym zdecydowanie częściej dwie, ze względu na instalowanie ich od strony szybu czerpakowego. Moc śrub napędowych na tych pogłębiarkach zawiera się w przedziale od kilkuset do 7600 kW [2].

### Metody pomiarowe

Pomiary eksploatacyjnych obciążeń śrub napędowych odbywały się przy użyciu wielu metod, w różnych miejscach układu napędowego. Wykorzystując wyniki pomiarów charakterystyk, przy znajomości sprawnościowych układów transmisji mocy, określano moce chwilowe na sprzęgle napędowym śruby.

Metody pomiarów wykorzystane podczas prac badawczych zależne były od rozwiązania układu napędowego, jak również od zainstalowanych na pogłębiarce stacjonarnych urządzeń pomiarowych i możliwości, jakie one stwarzały przy określaniu mocy chwilowej.

W przypadku śrub napędowych posługiwano się następującymi metodami określania mocy chwilowej:

- metodą wykorzystującą pomiar parametrów prądu pobieranego z sieci przez elektryczny silnik napędu śruby – metoda stosowana na pogłębiarkach ze spalinowo-elektrycznym napędem śrub (pogłębiarki: „inż. M. Bukowski”, „inż. S. Łęgowski”, „Kategats”);
- metodą wykorzystującą równoczesny pomiar momentu obrotowego przenieszonego przez wał napędowy śruby (przy wykorzystaniu momentomierzy tensometrycznych) i prędkości obrotowej (tachometry zainstalowane na silnikach głównych) (pogłębiarka „Geopotes 15”);
- metodą pośredniego określania mocy efektywnej silnika (jak i mocy na wale) wykorzystującą zależność  $N_{SG} = f(w \cdot n_{SG})$ , gdzie  $w$  – nastawa wskaźnika obciążenia silnika,  $n_{SG}$  – prędkość obrotowa silnika (pogłębiarki „Kostera”, „Kronos”).

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk rozkładu obciążeń śrub napędowych w rozpatrywanych stanach eksploatacji pogłębiarki, obejmujących:  $N_{SR}^{sr}$  – średnie obciążenie

nie śrub napędowych,  $\sigma_{SR}$  – odchylenia standardowe rozkładu obciążeń śrub napędowych,  $v_{SR} = \sigma_{SR} / N_{SR}^{sr}$  – współczynnik zmienności rozkładu obciążeń śrub napędowych,  $\lambda_{SR}^{se}$  – współczynnik określający udział czasu pracy śrub w danym stanie eksploatacji.

Wyznaczono minimalną wymaganą liczebność próby dla założonego normalnego lub zbliżonego do normalnego rozkładu obciążeń śrub napędowych. W tym celu wykorzystano przekształconą zależność na przedział ufności dla rozkładu normalnego o znanym odchyleniu standardowym [4]:

$$m \geq \left( \frac{t_\alpha \times \bar{\sigma}}{d} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

- $t_\alpha$  – wartość krytyczna testu dla współczynnika ufności  $(1 - \alpha)$  i  $(m_0 - 1)$  stopni swobody,  $t_\alpha = 1,96$  dla  $\alpha = 0,05$  i  $m_0 > 1000$ ; tablice [5];
- $\bar{\sigma}$  – względna wartość odchylenia standardowego z próby o liczebności  $m_0$ ;
- $d$  – założony błąd oszacowania średniej (najczęściej przyjmowany 0,01).

### Obciążenia śrub podczas wykonywania robót pogłębiarskich

Jak już wcześniej wspomniano, śruby napędowe podczas prowadzenia robót pogłębiarskich wykorzystywane są tylko na pogłębiarkach ssących nasiębiernych. W trakcie tych prac występują znaczne różnice w obciążeniach śrub, np. w związku z załadunkiem i pływaniem z lub bez ładunku pomiędzy miejscami załadunku i rozładunku. Dlatego też charakterystyki obciążeń śrub napędowych podczas „robót pogłębiarskich” zostały podane z podziałem na te dwie prace (tab. 1, 2).

W tabelach 1 i 2, oprócz danych charakteryzujących parametry rozkładu obciążeń śrub napędowych, podano liczebności poszczególnych prób. Częstość pomiarów obciążeń śrub napędowych przyjęto co 5 minut [5].

Minimalną liczebność próby określono wykorzystując zależność (1). Przyjmując, na podstawie wstępnych badań [5], wartość  $\bar{\sigma} = 0,08 - 0,15$  dla warunków pływania z lub bez ładunku oraz  $\bar{\sigma} = 0,02 - 0,05$  dla warunków załadunku, określono minimalną liczebność próby  $m = 245 - 865$  (pływanie z lub bez ładunku) i  $m = 16 - 96$  (załadunek). Wszystkie badane próby prowadzone w ramach badań własnych posiadały liczebność większą od minimalnej.

Tabela 1. Charakterystyki rozkładów obciążeń śrub napędowych na pogłębiarkach ssących nasiębiernych podczas pływania pomiędzy miejscami załadunku a rozładunku

Table 1. The characteristics of propeller load distributions of trailing suction hopper dredgers during sailing from and to the discharging area

Pogłębiarka	$N_{SR}^{nom}$	$N_{SR}^{sr}$	$\bar{N}_{SR}^{sr}$	$\sigma_{SR}$	$v_{SR}$	$\lambda_{SR}^{pl}$	$m$	Źródło informacji
	kW	kW	–	kW	–	–		
Kostera	410	119,4	0,291	42,7	0,358	0,98	892	badania własne
Kronos	395	175,4	0,444	34,5	0,197	0,99	585	badania własne
Łęgowski	1 900	734,5	0,386	312,3	0,425	0,99	1246	badania własne
Bukowski	1 900	629,3	0,331	230,5	0,366	1,00	1518	badania własne
Nautilus	2 000	1169,5	0,585	233,7	0,200	1,00	–	[6]
Gogland	8 450	4386,4	0,519	610,1	0,139	1,00	–	[7]
Geopotes 15	10 950	5736,2	0,524	1237,3	0,216	0,98	911	badania własne
Lange Wapper	11 250	6896,2	0,613	–	–	–	–	[8]
Średnia	–	–	0,462	–	0,272	0,992	–	–

Tabela 2. Charakterystyki rozkładów obciążeń śrub napędowych na pogłębiarkach ssących nasiębiernych podczas prac związanych z załadunkiem

Table 2. The characteristics of propeller load distributions of trailing suction hopper dredgers during dredging

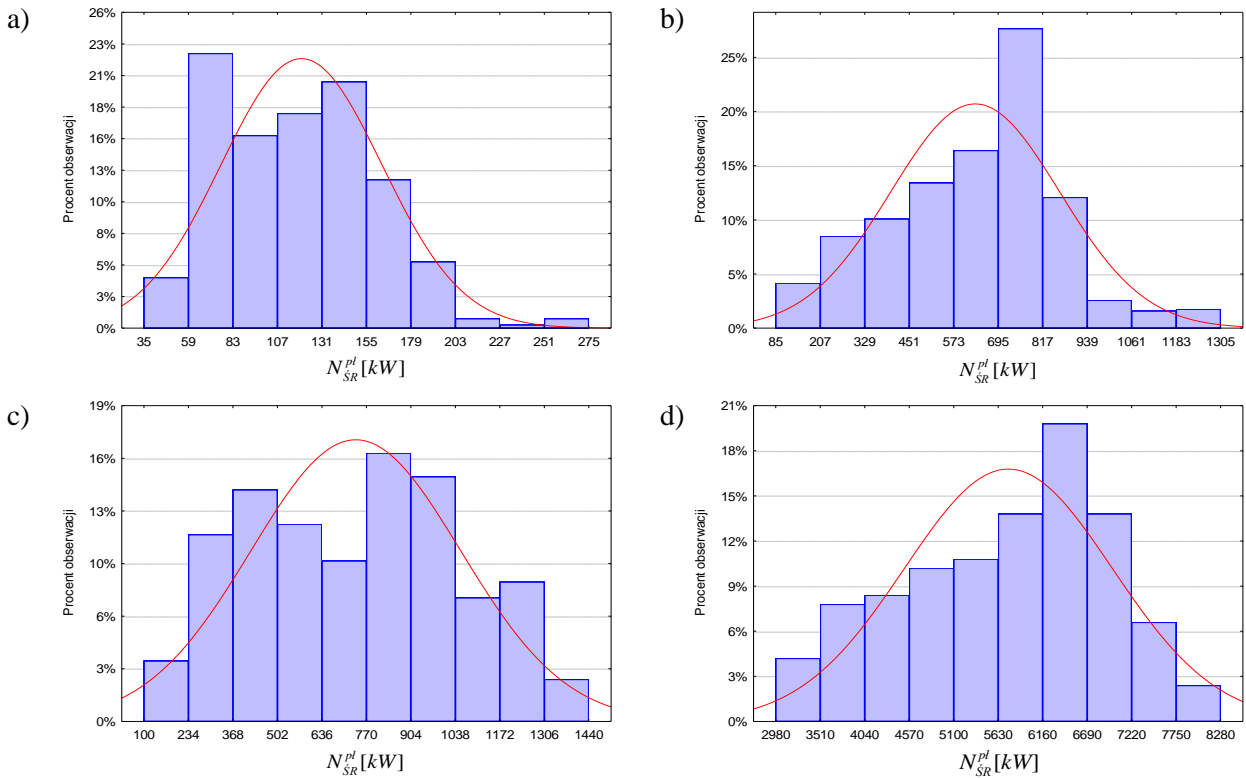
Pogłębiarka	$N_{SR}^{nom}$	$N_{SR}^{sr}$	$\bar{N}_{SR}^{sr}$	$\sigma_{SR}$	$v_{SR}$	$\lambda_{SR}^{zal}$	$m$	Źródło informacji
	kW	kW	–	kW	–	–		
Kostera	410	61,3	0,149	18,5	0,302	0,97	849	badania własne
Kronos	395	91,2	0,23	10,4	0,114	0,99	505	badania własne
Łęgowski	1900	216,7	0,114	57,7	0,266	1,00	1540	badania własne
Bukowski	1900	218,4	0,115	60,8	0,278	1,00	985	badania własne
Nautilus	2000	486,7	0,243	43,8	0,09	1,00	–	[6]
Gogland	8450	2087,6	0,247	251,7	0,121	0,99	–	[7]
Geopotes 15	10950	2647,5	0,242	270,6	0,102	1,00	592	badania własne
Lange Wapper	11250	2482,6	0,221	–	–	–	–	[8]
Średnia	–	–	0,195	–	0,182	0,993	–	–

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono histogramy obciążeń śrub napędowych wybranych pogłębiarek dla dwóch rozpatrywanych prac wchodzących w skład stanu „roboty pogłębiarskie”. Na rysunkach tych zaprezentowano histogramy obciążeń śrub wraz z krzywymi gęstości rozkładu normalnego.

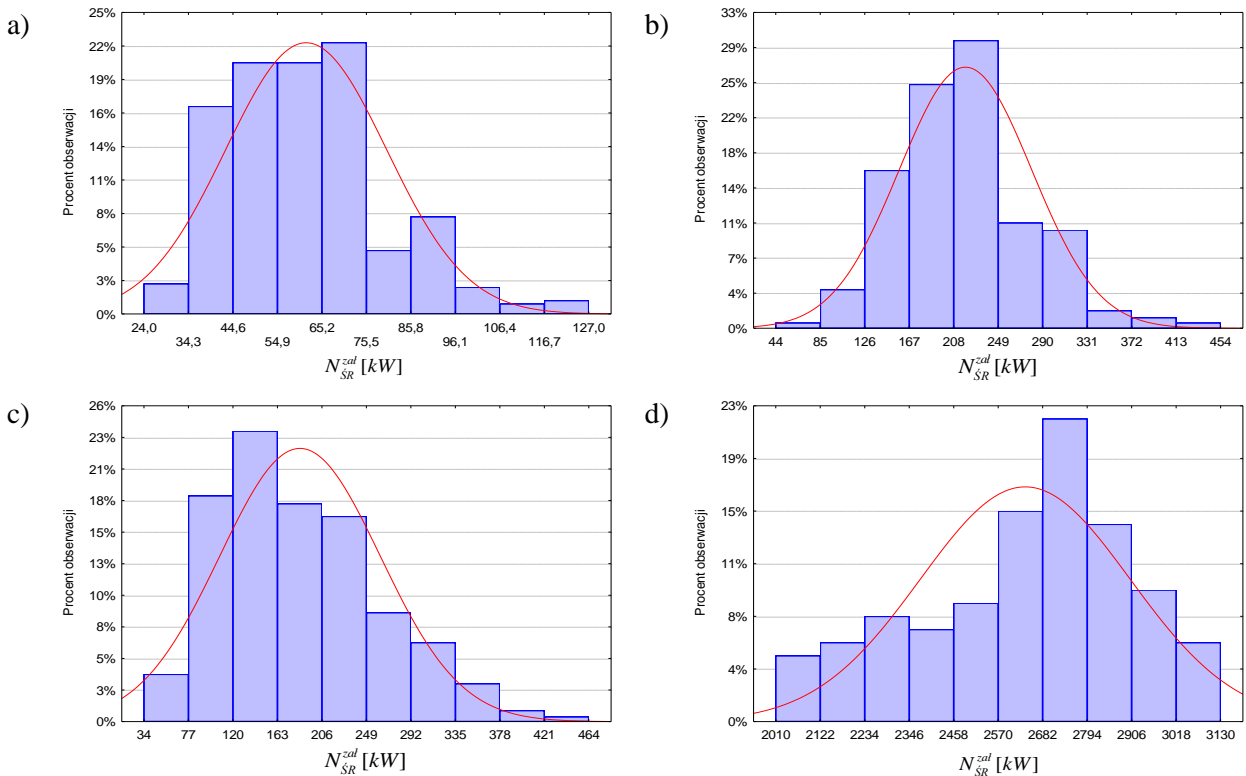
Przeprowadzone obliczenia parametrów rozkładów obciążeń śrub napędowych podczas pływania z ładunkiem lub bez pomiędzy miejscami załadunku a rozładunku wykazały, że dla poszczególnych pogłębiarek względne obciążenia średnie zawierają się w przedziale 0,291–0,613 przy wartości średniej 0,462 oraz współczynnika zmienności rozkładu w przedziale 0,139–0,425 przy wartości średniej 0,272. Należy zwrócić uwagę na istotną prawidłowość, że dla małych pogłębiarek (pierwsze cztery) średnie względne obciążenia są zdecydowanie niższe i wynoszą 0,291–0,444, zaś ich współczynniki zmienności rozkładu są wyższe i zawierają się w przedziale 0,197–0,425. Związane jest to z mniejszymi odległościami pomiędzy miejscami załadunku a rozładunku i co za tym idzie – zwiększonym procentowym udziałem czasowym manew-

rów w trakcie pływania. Dla pogłębiarek należących do grupy średnich i dużych średnie względne wartości obciążeń śrub napędowych zawierają się w przedziale 0,519–0,613, zaś współczynniki zmienności rozkładów obciążeń w: 0,139–0,23.

Obliczenia parametrów rozkładów obciążeń śrub napędowych podczas załadunku wykazały, że dla poszczególnych pogłębiarek względne obciążenia średnie zawierają się w przedziale 0,114–0,247 przy wartości średniej 0,195 oraz współczynnika zmienności rozkładu w przedziale 0,09–0,302 przy wartości średniej 0,182. Podobnie jak dla warunków pływania pomiędzy miejscami załadunku a rozładunku, małe pogłębiarki charakteryzują się mniejszymi średnimi względnymi obciążeniami śrub, wynoszącymi 0,114–0,23 i jednocześnie wyższymi współczynnikami zmienności rozkładów obciążeń (0,114–0,302). Średnie i duże pogłębiarki cechują się odpowiednio średnimi wartościami względnych obciążeń w zakresie 0,221–0,247 i współczynnikami zmienności rozkładów obciążeń w przedziale 0,09–0,121. Wynika to prawdopodobnie z faktu dużej częstotliwości prac małych



Rys. 1. Histogramy obciążeń śrub napędowych pogłębiarek ssących nasiębiernych podczas pływania pomiędzy miejscami załadunku a rozładunku: a) „Kostera”, b) „Bukowski”, c) „Łęgowski”, d) „Geopotes 15”  
 Fig. 1. Load distributions of propellers of trailing suction hopper dredger during sailing from and to the discharging area: a) “Kostera”, b) “Bukowski”, c) “Łęgowski”, d) “Geopotes 15”



Rys. 2. Histogramy obciążeń śrub napędowych pogłębiarek ssących nasiębiernych podczas prac związanych z załadunkiem: a) „Kostera”, b) „Bukowski”, c) „Łęgowski”, d) „Geopotes 15”  
 Fig. 2. Load distributions of propellers of trailing suction hopper dredger during dredging: a) “Kostera”, b) “Bukowski”, c) “Łęgowski”, d) “Geopotes 15”

pogłębiarek w obszarach portowych i związane z tym ograniczenia w wykorzystywaniu pełnego potencjału pogłębiarki.

### Obciążenia śrub podczas stanu „pływanie swobodne”

Stan eksploatacji „pływanie swobodne” występuje nie tylko na pogłębiarkach ssących nasiębiernych, ale również na części pogłębiarek frezująco-ssących i wieloczerpakowych – tej części, która wyposażona została we własny napęd.

W tabeli 3 zestawiono dane charakteryzujące parametry rozkładu obciążeń śrub napędowych na 7 pogłębiarkach ssących nasiębiernych i 2 wieloczerpakowych. Podano również liczebności poszczególnych prób. Minimalną liczebność próby określono wykorzystując zależność (1). Przyjmując, na podstawie wstępnych badań [gr], wartość  $\bar{\sigma} = 0,1 - 0,13$ , określono minimalną liczebność próby  $m = 384 - 649$ . Wszystkie próby prowadzone w ramach badań własnych posiadały liczebność większą od minimalnej.

Na rysunku 3 przedstawiono histogramy obciążeń śrub napędowych wybranych pogłębiarek dla stanu „pływanie swobodne”.

Przeprowadzone obliczenia parametrów rozkładów obciążeń śrub napędowych podczas pływania swobodnego wykazały, że niezależnie od typu pogłębiarek względne obciążenia średnie zawierają się w przedziale 0,507–0,655 przy wartości średniej 0,578. Na pogłębiarkach ssących nasiębiernych warunki i charakter pracy układu energetycznego podczas stanu „pływanie swobodne” są zbliżone do warunków panujących podczas pływania z i bez ładunku w trakcie wykonywania robót pogłębiarskich. Zachodzą podobne zależności pomiędzy

wartościami średnimi obciążeń śrub napędowych, jak w przypadku obciążeń silników głównych [9].

Z danych zawartych w tabelach 1 i 3 wynika, że wartości średnie obciążeń śrub napędowych małych pogłębiarek dla pływania w czasie robót pogłębiarskich  $(N_{SR}^{sr})_{rp}^{pl}$  stanowią 0,552–0,702 średniego obciążenia śrub napędowych podczas pływania swobodnego  $(N_{SR}^{sr})_{ps}$ . Dla średnich i dużych pogłębiarek wartości te wynoszą:

$$(N_{SR}^{sr})_{rp}^{pl} = 0,894 - 0,936(N_{SR}^{sr})_{ps}$$

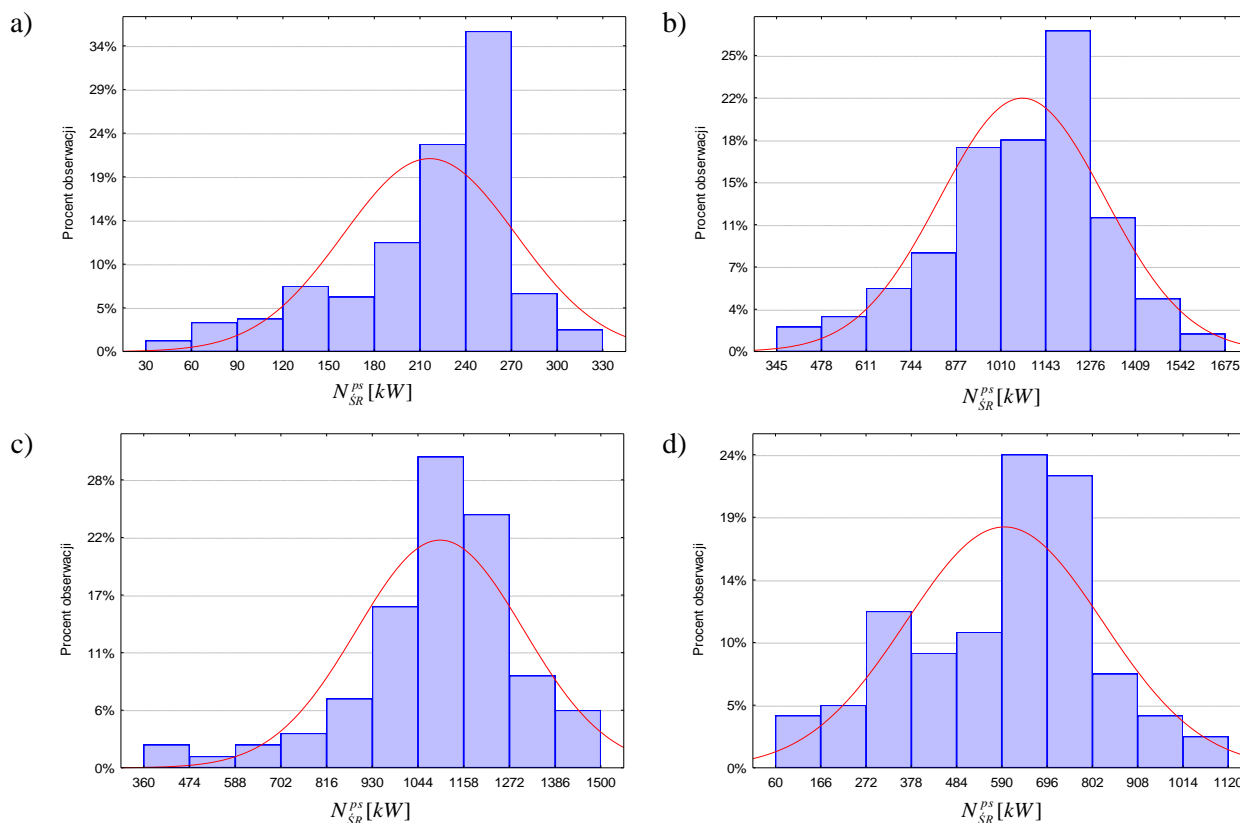
Wyjaśnieniem tego są odległości pomiędzy miejscami załadunku a wyładunku. Dla małych pogłębiarek odległości te sięgają kilku Mm, stąd duży udział czasu manewrów w trakcie pływania podczas robót pogłębiarskich i niższe wartości średnie obciążeń śrub napędowych. Im większe pogłębiarki, tym odległości pomiędzy miejscem załadunku a rozładunku rosną. Dla dużych pogłębiarek osiąga wartość kilkudziesięciu Mm.

Współczynniki zmienności rozkładu zawierają w przedziale 0,171–0,379 przy wartości średniej 0,251, przy czym dla pogłębiarek ssących nasiębiernych wartości współczynników zmienności są mniejsze i zawierają się w przedziale 0,171–0,245 przy wartości średniej 0,216. Wartość średnia współczynnika zmienności rozkładów obciążeń śrub napędowych pogłębiarek wieloczerpakowych wynosi 0,357. Prawdopodobną przyczyną wyższych współczynników zmienności dla pogłębiarek wieloczerpakowych są warunki charakteryzujące stan „pływanie swobodne”. Cechowały się one najmniejszymi odległościami z portu na miejsce pracy i z powrotem oraz dużą liczbą manewrów.

Tabela 3. Charakterystyki rozkładów obciążeń śrub napędowych na pogłębiarkach ssących nasiębiernych i wieloczerpakowych podczas stanu „pływanie swobodne”

Table 3. The characteristics of propeller load distributions of different dredgers types during sailing at sea

Pogłębiarka	$N_{SR}^{nom}$	$N_{SR}^{sr}$	$\bar{N}_{SR}^{sr}$	$\sigma_{SR}$	$\nu_{SR}$	$\lambda_{SR}^{ps}$	$m$	Źródło informacji
	kW	kW	–	kW	–	–		
Kostera	410	216,1	0,527	54,7	0,253	0,98	504	badania własne
Kronos	395	249,6	0,632	57,3	0,229	1,00	448	badania własne
Łęgowski	1900	1068,3	0,562	241,7	0,226	0,98	1058	badania własne
Bukowski	1900	1109,9	0,584	190,3	0,171	0,99	658	badania własne
Gogland	8450	4906,0	0,581	846,4	0,173	–	–	[7]
Geopotes 15	10950	6125,6	0,559	1499,7	0,245	1,00	748	badania własne
Lange Wapper	11250	7372,2	0,655	–	–	–	–	[8]
Kategats	1180	598,6	0,507	226,9	0,379	0,99	663	badania własne
Ivan Bachalov	1180	706,3	0,598	236,9	0,335	–	–	[10]
Średnia	–	–	0,578	–	0,251	0,99	–	–



Rys. 3. Histogramy obciążeń śrub napędowych pogłębiarek ssących nasiębiernych i wieloczerpakowych podczas stanu „pływanie swobodne”; a) „Kostera”, b) „Łęgowski”, c) „Bukowski”, d) „Kategats”

Fig. 3. Load distributions of propellers of different dredgers types during sailing at sea; a) “Kostera”, b) “Łęgowski”, c) “Bukowski”, d) “Geopotes 15”

## Podsumowanie

Wszystkie podane w pracy wyniki obliczeń, dotyczące charakterystyk obciążeń śrub napędowych i histogramy ich obciążeń odzwierciedlają rzeczywistość eksploatacyjną na pogłębiarkach. Ze względu na dużą liczbę badanych pogłębiarek i szeroki przedział ich wielkości wyniki można uznać za reprezentatywne dla wszystkich pogłębiarek.

Przedstawione wyniki mogą być przydatne do prognozowania eksploatacyjnych obciążeń śrub napędowych w zależności od stanu eksploatacji pogłębiarki, co w powiązaniu ze znajomością obciążeń innych głównych odbiorników i przy znajomości danych sprawnościowych układów transmisji mocy poszczególnych głównych odbiorników, pozwoli na określenie charakterystyk obciążeń eksploatacyjnych silników głównych na pogłębiarkach – jest to szczególnie istotne na wstępnych etapach projektowania ich układów energetycznych.

## Bibliografia

1. VLASBLOM J.W.: Designing dredging equipment. Lecture notes, TUDelft 2003-05.
2. BOCHENSKI D.: Baza danych DRAGA i możliwości jej wykorzystania w projektowaniu układów energetycznych pogłębiarek. W: /Mat./ XXIII Sympozjum Siłowni Okrętowych, AM Gdynia 2002.

3. BOCHENSKI D.: Analiza rozwiązań konstrukcyjnych i zależności określających parametry układów energetycznych pogłębiarek ssących nasiębiernych. Zeszyty Naukowe AM w Szczecinie nr 73, XXIV Sympozjum Siłowni Okrętowych, Szczecin 2003.
4. BOBROWSKI D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1986.
5. BOCHENSKI D. (kierownik projektu) i in.: Badania identyfikacyjne energochłonności i parametrów urabiania oraz transportu urobku dla wybranych pogłębiarek i refulerów. Raport końcowy projektu badawczego KBN nr 9T12C01718. Prace badawcze WOIo PG nr 8/2002/PB, Gdańsk 2002.
6. Dokumentacja prób zdawczo-odbiorczych pogłębiarki „Nautilus”, GSR, Gdańsk 1996.
7. Kompleksyjne technologiczkie issledowanija sudov popolnienija unstrukcyja po efffektiwnoj eksploatacji ziemsnarjada „Gogland”. GDK, Rostow nad Donem 1984.
8. DE VRIES L.: Total performance simulations of ship energy concepts. Wondermar II Workshop, Bremen 2004.
9. BOCHENSKI D.: Eksploatacyjne obciążenia silników spalinyowych pogłębiarek ssących nasiębiernych w podstawowych stanach ich eksploatacji. Journal of Polish CIMAC.
10. Kompleksyjne technologiczkie issledowanija sudov popolnienija unstrukcyja po efffektiwnoj eksploatacji ziemsnarjada „Ivan Bachalov”. GDK, Rostow nad Donem 1985.

*Recenzent:*  
dr hab. inż. Zbigniew Matuszak  
profesor Akademii Morskiej w Szczecinie