

REMARKS UPON ADEQUACY OF CONDITIONS OF ISO 8178 EMISSION TESTS WITH REGARDS TO REAL OPERATION CONDITIONS OF MARINE ENGINES

Andrzej Balcerski

*Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
tel.: +58 3471024, fax.: +58 3471174
e-mail: jkropiwn@pg.gda.pl*

Jacek Kropiwnicki

*Gdańsk University of Technology, Mechanical Engineering Faculty
Narutowicza Street 11/12, 80-952 Gdańsk
tel.: +58 3471024, fax.: +58 3471174
e-mail: jkropiwn@pg.gda.pl*

Abstract

General characterisation of NO_x research tests of vessel units has been presented in this paper. Estimation of difficulties of research cycles realization for main engines, which drive fixed pitch propellers during sea acceptance trials have been presented, as well as remarks upon adequacy of loads recommended by specific tests for loads, which occur during operation of different type ships. These opinions refer to the two issues: the possibility of the performance of the tests of installed engines on the ship, the conformability of the loads of engines, enforced by tests cycles with the loads of engines in the different applications, occurring during a real exploitation. The main and auxiliary engines with various design, size and the character of work are subjected to tests for the non automobile engines, defined within the framework of general of 11. a phase test carrying out on the engine test stands and defined by the rule ISO 8178. For each cycle of tests the rule defines the position of the performance points in the relative values coordinate system: the engine load (rotary torque or power on shaft) and rotational speed. In each of these points the measurements of emission in the conditions of established performance are carried out. For the calculation of total emission, the weight coefficients (scales) given for these points are taken into consideration. Among 14. tests defined by the ISO 8178 rule, with respect to the engines working on the floating units 7 tests can be applied, from what till 5 (E1-E5) to the main engines. Next, the rules of the International Marine Organization (IMO) and Polish Ships Register refer to the CI ship's engines, power above 130 kW and they encompass signified tests C1, D2, E2, E3.

Keywords: *NO_x research tests, marine engines, operation conditions*

UWAGI O ADEKWATNOŚCI WARUNKÓW TESTÓW EMISYJNYCH ISO 8178 W ODNIESIENIU DO RZECZYWISTYCH WARUNKÓW EKSPLOATACJI SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Streszczenie

W referacie przedstawiono ogólną charakterystykę testów badawczych NO_x silników jednostek pływających, ocenę trudności realizacji cykli badawczych silników głównych napędzających śrubę o skoku ustalonym podczas morskich prób zdawczych a także uwagi i ocenę adekwatności obciążeń zalecanych poszczególnymi testami w stosunku do obciążeń występujących podczas eksploatacji statków różnych typów. Oceny te odnoszą się do dwóch zagadnień: możliwości przeprowadzenia testów silników zainstalowanych na statku, zgodności obciążeń silników, narzuconych cyklami prób z obciążeniami silników o różnych zastosowaniach, występującymi podczas rzeczywistej eksploatacji. Silniki główne i pomocnicze o zróżnicowanej budowie, wielkości i charakterze pracy podlegają testom dla silników nie-samochodowych, określonym w ramach ogólnego 11. fazowego testu przeprowadzanego na hamowniach i podanego normą ISO 8178. Dla każdego cyklu prób norma określa położenie punktów pracy w układzie wartości

względnych: obciążenie silnika (moment obrotowy lub moc na wale) i prędkość obrotowa. W każdym z tych punktów wykonuje się pomiary emisji w warunkach pracy ustalonej. Celem obliczenia emisji całkowitej uwzględnia się podane dla tych punktów współczynniki wagowe (wagi). Spośród 14. testów określonych normą ISO 8178, w odniesieniu do silników pracujących na jednostkach pływających może być stosowanych 7 testów, z czego aż 5 (E1-E5) do silników głównych. Z kolei przepisy Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) oraz Polskiego Rejestru Statków odnoszą się do silników okrętowych ZS, mocy powyżej 130 kW i obejmują testy oznaczone C1, D2, E2, E3

Słowa kluczowe: cykle badawcze NO_x , silniki okrętowe, warunki eksploatacji

1. Wprowadzenie

W referacie zawarto próbę oceny wymagań określających cykle prób (testy emisyjne NO_x) silników stosowanych na statkach z uwzględnieniem rzeczywistych warunków eksploatacji jednostek pływających. Oceny te odnoszą się do dwóch zagadnień:

- możliwości przeprowadzenia testów silników zainstalowanych na statku,
- zgodności obciążeń silników, narzuconych cyklami prób z obciążeniami silników o różnych zastosowaniach, występującymi podczas rzeczywistej eksploatacji.

Silniki główne i pomocnicze o zróżnicowanej budowie, wielkości i charakterze pracy podlegają testom dla silników niesamochodowych, określonym w ramach ogólnego 11. fazowego testu przeprowadzanego na hamowniach i podanego normą ISO 8178 [3-4]. Dla każdego cyklu prób norma określa położenie punktów pracy w układzie wartości względnych: obciążenie silnika (moment obrotowy lub moc na wale) i prędkość obrotowa. W każdym z tych punktów wykonuje się pomiary emisji w warunkach pracy ustalonej. Celem obliczenia emisji całkowitej uwzględnia się podane dla tych punktów współczynniki wagowe (wagi). Spośród 14. testów określonych normą ISO 8178, w odniesieniu do silników pracujących na jednostkach pływających może być stosowanych 7 testów, z czego aż 5 (E1-E5) do silników głównych. Z kolei przepisy Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) oraz Polskiego Rejestru Statków odnoszą się do silników okrętowych ZS, mocy powyżej 130 kW i obejmują testy oznaczone C1, D2, E2, E3 [4-6]. Charakterystyki wymienionych testów zawarto w Tab. 1-2. Omawiane testy są w zależności od rodzaju silnika i jego zastosowania zalecane:

- cykl prób C1 - dla silników pomocniczych pracujących przy $n = var$, np. silników napędzających oddzielne pompy,
- cykl prób D2 - dla silników pomocniczych pracujących przy $n = idem$, np. silników napędzających prądnice prądu przemiennego,
- cykl prób E1 - dla silników ZS pracujących przy $n = var$, na statkach o długości < 24 m, z wyłączeniem holowników i pchaczy,
- cykl prób E2 - dla silników ZS, przeznaczonych do napędu głównego statków pracujących przy $n = idem$, obejmujących układy napędowe spalinowo-elektryczne oraz układy ze śrubą o skoku nastawnym,
- cykl prób E3 - dla silników ZS pracujących na statkach po krzywej śrubowej, głównych i pomocniczych,
- cykl prób E4 - dla silników ZI na jednostkach pływających (łodziach rekreacyjnych), o długości < 24 m, pracujących po krzywej śrubowej,
- cykl prób E5 - dla silników ZS, pracujących na statkach o długości < 24 m, z wyłączeniem holowników i pchaczy, cykl ten może być stosowany równorzędnie z cyklem E1.

2. Uwagi o możliwościach przeprowadzenia badań emisyjnych okrętowych silników napędu głównego zainstalowanych na statkach

W ogólnym przypadku norma ISO 8178 dopuszcza badania silników zarówno na stanowiskach prób (hamowniach) jak i w miejscach ich zainstalowania. Ogranicza się to do takich zastosowań silników, dla których możliwa jest praca z takimi samymi cyklami badawczymi jak na stanowiskach. W przypadku silników okrętowych napędu głównego, szczególnie wolnoobrotowych, pracujących

w układach napędowych ze śrubą o skoku ustalonym, istnieje szczególna sytuacja. Układy takie występują na ok. 70% eksploatowanych i budowanych statkach towarowych. Szczegółowe uściślenie zaleceń i warunków odbywania prób silników okrętowych, podane w Kodeksie Technicznym NO_x [5] i przepisowej publikacji PRS [6] określają, że pomiary emisji NO_x mogą być przeprowadzone:

- na stanowisku prób w ramach przeglądu wstępnego. W uzasadnionych przypadkach przegląd ten może być przeprowadzony po zamontowaniu silnika na statku, ale przed rozpoczęciem jego eksploatacji,
- na statku w ramach połączonego przeglądu wstępnego i zasadniczego zgodnego z wymaganiami prób zdawczych,
- w ramach uproszczonej metody pomiaru na statku przy okresowych przeglądach,
- przez bezpośredni pomiar na statku przez Armatora.

Tab. 1 Parametry pracy i wartości współczynników wagowych dla cykli prób, w których obciążenie silników o zastosowaniach okrętowych określa moment obrotowy [4-6]

Tab. 1 Operation parameters and weight factors for trials, when marine engine loads are defined by torque [4-6]

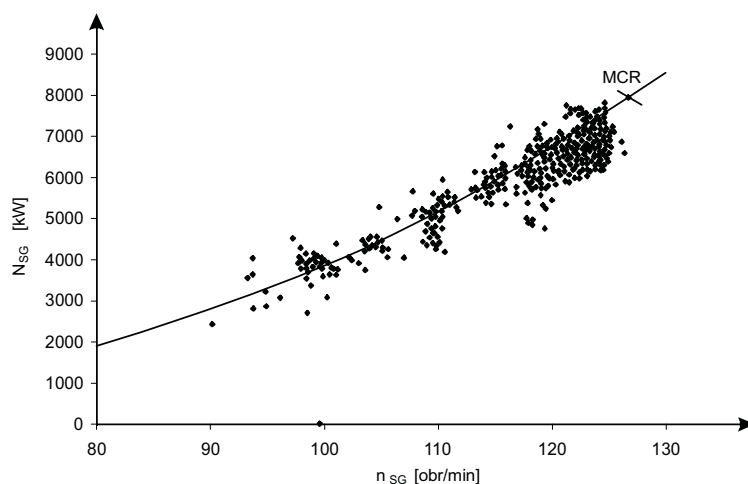
| Oznaczenie cyklu | Charakt. | Faza | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------|-----------|------|------|------|------|-----------|------|------|----|----|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| | Moment obrot. % | 100 | 75 | 70 | 24 | 10 | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 | 0 |
| Prędkość obrot. | | Nominalna | | | | | Pośrednia | | | | | Biegu luzem |
| C1 | Pojazdy pozadrogowe | 0,15 | 0,15 | 0,15 | – | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | – | – | 0,15 |
| D2 | Praca przy <i>n=idem</i> | 0,05 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,10 | – | – | – | – | – | – |
| E1 | Zastosowania morskie | 0,08 | 0,11 | – | – | – | – | 0,19 | 0,32 | – | – | 0,30 |
| E2 | | 0,20 | 0,50 | 0,15 | 0,15 | – | – | – | – | – | – | – |

Tab. 2 Parametry pracy i wartości współczynników wagowych dla cykli prób, w których obciążenie silników napędu głównego w zastosowaniach morskich określa moc zmieniana po krzywej śrubowej [5-6]

Tab. 2 Operation parameters and weight factors for trials, when loads of marine main engines are defined by power depended on propeller curve [5-6]

| Oznaczenie cyklu | Charakt. | Faza | | | | |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| E3 | Moc % | 100 | 75 | 50 | 25 | |
| | Prędkość obrot. % | 100 | 91 | 80 | 63 | |
| | Wsp. wagowy | 0,20 | 0,50 | 0,15 | 0,15 | |
| E4 | Moc % | 100 | 80 | 60 | 40 | 0 |
| | Prędkość obrot. % | 100 | 71,6 | 46,5 | 25,3 | Biegu luzem |
| | Wsp. wagowy | 0,06 | 0,14 | 0,15 | 0,25 | 0,40 |
| E5 | Moc % | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |
| | Prędkość obrot. % | 100 | 91 | 80 | 63 | Biegu luzem |
| | Wsp. wagowy | 0,08 | 0,13 | 0,17 | 0,32 | 0,30 |

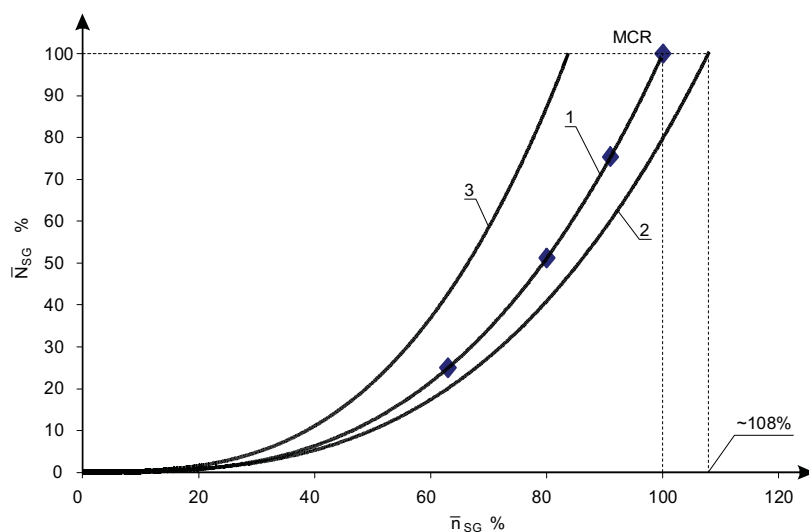
Istotnym problemem, występującym w odniesieniu do omawianych silników zamontowanych na statkach, jest możliwość prawidłowej realizacji cyklu badawczego E3 w sensie usytuowania wymaganych punktów pomiarów. Podczas eksploatacji statku pływającego z ładunkiem w różnych warunkach pogodowych, punkty pracy rozkładają się w taki sposób, iż ich część sytuuje się na krzywej śrubowej przechodzącej przez punkt parametrów nominalnych (MCR). Umożliwia to dokonywanie pomiarów emisyjnych zgodnie z założonym cyklem, choć mogą wystąpić trudności przy małych obciążeniach silnika (Rys. 1).



Rys. 1. Parametry pracy silnika głównego Sulzer 5RTA58 o mocy 7950 kW na kontenerowcu „Nordisle” zgodnie z zapisem automatycznego rejestratora [2]

Fig. 1. Operation parameters of main engine Sulzer 5RTA58, power 7950 kW on containership „Nordisle” due to automatic registration [2]

Odmienne wygląda sytuacja w przypadkach konieczności przeprowadzenia badań silnika na statku przed rozpoczęciem jego eksploatacji. W takich przypadkach odpowiednie pomiary mogą być przeprowadzone tylko podczas morskich prób zdawczych. Statek bez ładunku pływa wówczas przy stosunkowo niewielkim zanurzeniu z zapełnionymi zbiornikami balastowymi. Wynikają z tego określone konsekwencje (Rys. 2).



Rys. 2. Krzywe śrubowe przy różnych warunkach zewnętrznych pływania: 1-przechodząca przez punkt parametrów nominalnych, podana w cyklu pomiarowym E3, 2-pływanie pod balastem podczas prób morskich, 3-ciężkie warunki

Fig. 2. Propeller curves for different exterior driving conditions: 1-MCR point included, given in measuring cycle E3, 2-ship in ballast, during sea acceptance trial, 3-heavy conditions

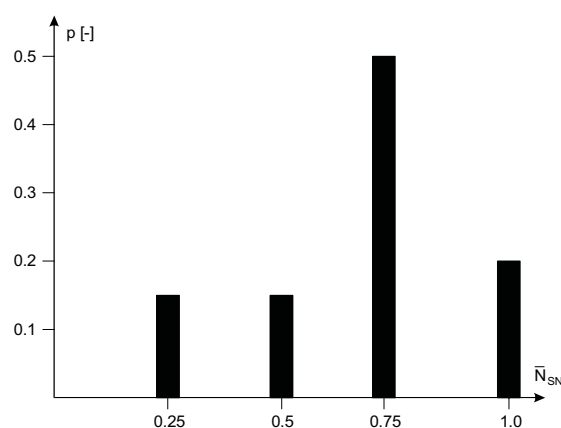
Krzywa śrubowa:

$$\bar{N}_{SG} = k \cdot \bar{n}_{SG}^3, \quad (1)$$

określa teoretyczną zależność mocy zapotrzebowanej przez śrubę i pokrywanej przez silnik główny (N_{SG}) od prędkości obrotowej (n_{SG}). Parametr k ujmuje wpływ warunków pływania: lekkich (krzywa 2) i ciężkich (krzywa 3). Kształt krzywej 2 wynika z konieczności wykazania możliwości pracy silnika głównego z mocą nominalną w czasie prób zdawczych. Związane to jest wówczas z dopuszczeniem przez producentów silników wolnoobrotowych pracy z prędkością obrotową $\bar{n}_{SG} \sim 108\%$. Z rysunku wyraźnie widać, że położenie punktów pomiarowych na krzywej 2 musiałyby odbiegać od pokazanych zgodnie z cyklem na krzywej 1. Norma ISO 8178 i publikacje PRS nie mówią o konsekwencjach tej sytuacji.

3. Uwagi o zgodności rozkładów obciążeń silników, zalecanych cyklami prób a rozkładami występującymi podczas eksploatacji

Porównania warunków pracy silników określonych danymi cykli prób z warunkami występującymi podczas eksploatacji można dokonać przez zestawienie parametrów odpowiednich rozkładów. W przypadku najważniejszych cykli E2 i E3, zalecany nimi rozkład odpowiednich obciążeń i współczynników wagowych (odpowiadających prawdopodobieństwu ich zaistnienia), pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Histogram rozkładów obciążeń silników głównych jednostek pływających pracujących w ciężkich warunkach E2 (przy $\bar{n}_{SG} = idem$) i E3 (po krzywej śrubowej) [4-6]

Fig. 3. Histogram of distribution of marine main engine loads for heavy conditions E2 (upon $\bar{n}_{SG} = idem$) and E3 (due to propeller curve) [4-6]

Na Rys. 4 pokazano przykładowe histogramy rozkładu obciążeń silnika głównego na różnych typach statków i przy różnych stanach eksploatacji [1-3].

Dla celów porównawczych określano parametry charakteryzujące rozkłady:

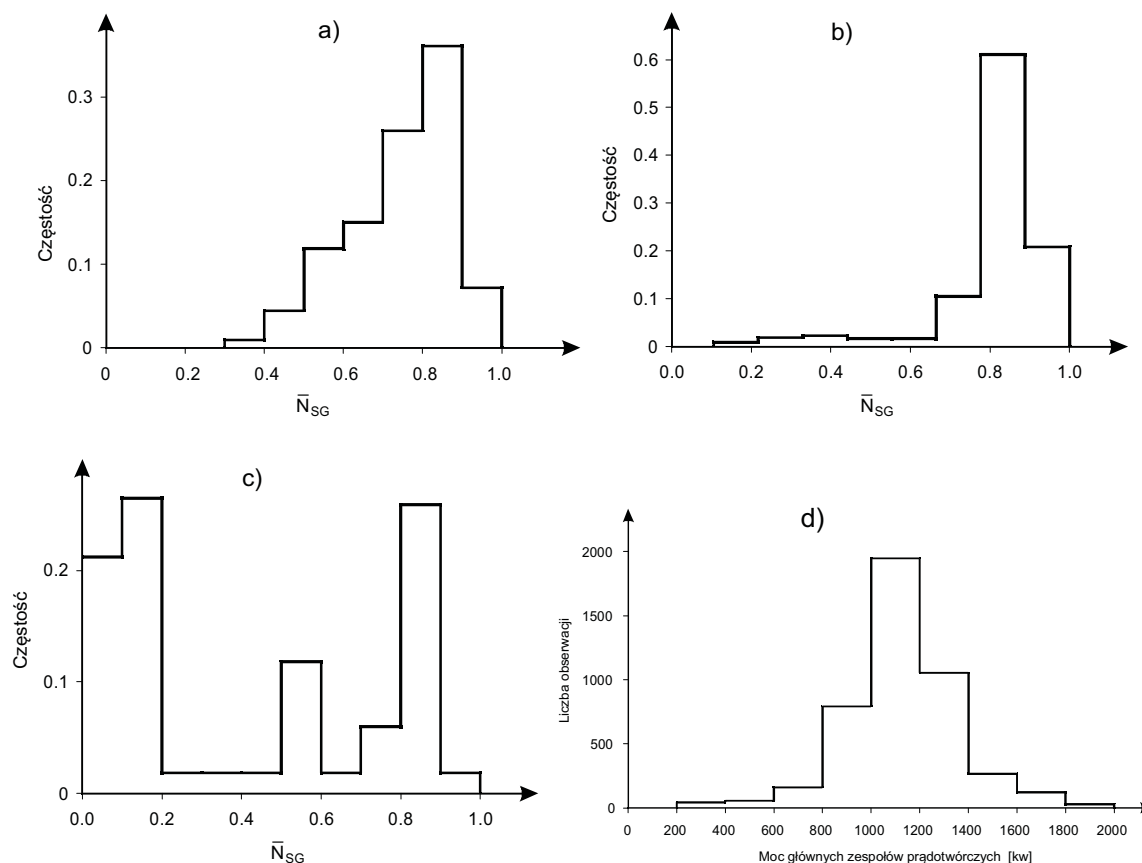
- średnie względne obciążenie silnika: $\bar{N}_{SG}^{sr} = \frac{N_{SG}^{sr}}{N_{SG}^{nom}}$
- współczynnik zmienności rozkładu obciążeń silnika głównego: $v_{SG} = \frac{\sigma_{SG}}{N_{SG}^{sr}}$

gdzie:

N_{SG}^{sr} , N_{SG}^{nom} - obciążenie silnika głównego odpowiednio: średnie i nominalne,

σ_{SG} - odchylenie standardowe rozkładu obciążeń.

Odpowiednie dane porównawcze przedstawiono w Tab. 3.



Rys. 4 Histogramy rozkładu obciążeń silników głównych [1-3]: a) kontenerowiec „Nordisle”, pływanie swobodne, b) trawler-przetwórnia B-414 „Pollux”, pływanie swobodne, c) baza rybacka „Rybackaja Slava”, praca na łowisku, d) pogłębiarka „Inż. St. Łęgowski”, prace pogłębiarskie

Fig. 4 Histograms of distribution of main engine loads [1-3]: a) container „Nordisle”, without restraints driving, b) trawler- processing plant B-414 „Pollux”, without restraints driving, c) fishing base „Rybackaja Slava”, running on a sea fishery, d) deepener-ship „Inż. St. Łęgowski”, deepening running

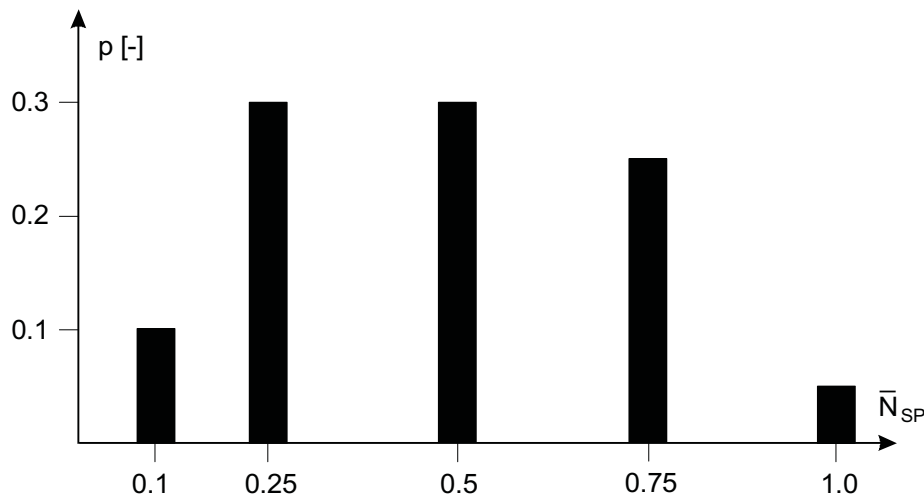
Tab. 3 Parametry rozkładów obciążeń silników głównych na jednostkach pływających i cykli badawczych [1-3]

Tab. 3 Parameters of distribution of marine main engine loads and research cycles [1-3]

| Typ statku | Liczba statków | Rodzaj układu napędowego | Stan eksploatacji | Parametry rozkładu | |
|-----------------------|----------------|--|---------------------|---------------------|-------------|
| | | | | \bar{N}_{SG}^{sr} | u_{SG} |
| Drobnicowce | 7 | bezpośredni, $n = var$ | pływanie swobodne | 0,838 | 0,129 |
| Masowce | 8 | bezpośredni, $n = var$ | pływanie swobodne | 0,824 | 0,079 |
| Promy i con-ro | 3 | bezpośredni i przekładniowe | pływanie swobodne | 0,775 | 0,216 |
| Kontenerowce | 7 | bezp. i przekładniowe z prądnicą zawieszoną | pływanie swobodne | 0,810 | 0,013 |
| Trawlery przetwórnice | 17 | bezp., przekładniowe, spal. - elektryczne | pływanie swobodne | 0,63 - 0,88 | 0,07 - 0,15 |
| | | | praca na łowisku | 0,60 - 0,68 | 0,14 - 0,25 |
| Bazy rybackie | 6 | bezpośredni, $n = var$ | pływanie swobodne | 0,812 | 0,165 |
| | | | praca na łowisku | 0,465 | 0,637 |
| Pogłębiarki | 5 | spalinowo - elektryczne, przekładniowe mech, | prace pogłębiarskie | 0,376 | 0,205 |
| Cykle prób E2 i E3 | | | bez określenia | 0,688 | 0,342 |

Zamieszczone wyżej dane wskazują, że obciążenia zalecane cyklami E2 i E3 mogą być dobrym uśrednieniem wartości obciążeń osiąganych przez silniki na jednostkach różnych typów, pływających w różnych stanach eksploatacji.

W odniesieniu do dyklu D2 stosowanego w przypadku silników pomocniczych, napędzających prądnice prądu przemiennego i tworzących elektrownię okrętową, odpowiednie histogramy rozkładu obciążeń (\bar{N}_{SP}) pokazano na Rys. 5.



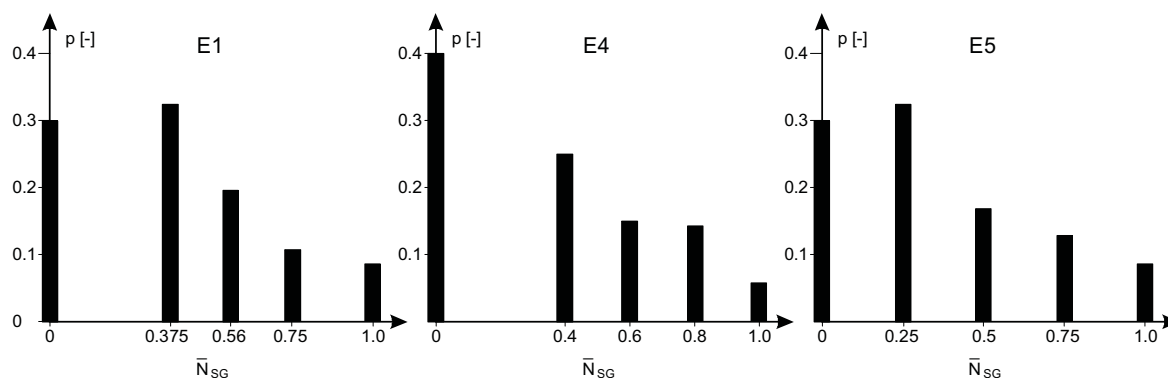
Rys. 5 Histogram rozkładu obciążeń silników pomocniczych pracujących przy $n_{SP} = idem$ [4-6]
 Fig. 5 Histogram of distribution of auxiliary engine loads upon $n_{SP} = idem$ [4-6]

Obliczone dla tego rozkładu (analogicznie jak z zal. 2) parametry wynoszą: $\bar{N}_{SP}^{sr} = 0,472$
 $v_{SP} = 0,528$

Elektrownie okrętowe projektowane są przy wykorzystaniu prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną, stwarzanego przez wszystkie odbiorniki (kilkaset szt.), pracujące w danym stanie eksploatacji. Zapotrzebowanie to pokrywają zespoły prądotwórcze, dobierane w taki sposób (jeden lub kilka, jednakowe bądź różne) aby w najważniejszych stanach eksploatacji ich silniki pracowały ze średnim obciążeniem w przedziale $\bar{N}_{SP} = 0,6 - 0,85$. Obciążenia niższe niż 0,6 są niekorzystne ze względu na wzrost jednoskowego zużycia paliwa, zaś wyższe niż 0,85 mogą przy nagłym wzroście obciążenia doprowadzić do przeciążenia i zatrzymamnia silnika. Nietrafność doboru elektrowni, głównie wielkości zespołów (~10% projektów), a także nie przestrzeganie zasad eksploatacji, skutkują w pewnych przypadkach długotrwałą pracą przy nie zalecanych obciążeniach. Takim typowym przypadkiem jest długotrwały stan gdy silnik jednego zespołu pracuje z obciążeniem $\bar{N}_{SP} \sim 0,95$, które po uruchomieniu drugiego identycznego spada do $\bar{N}_{SP} \sim 0,47$. Uwzględniając powyższe wywody można stwierdzić, że dla zdecydowanej większości zespołów prądotwórczych, prawidłowo dobranych i eksploatowanych na komercyjnych jednostkach pływających, rozkład obciążeń podany cyklem D2 charakteryzują: zbyt niskie średnie obciążenie i zbyt duży współczynnik zmienności.

Cykle prób E1, E4 i E5 określają odpowiednie rozkłady obciążeń, których histogramy pokazano na Rys. 6. Cykle te przewidziane dla silników głównych mniejszych jednostek rekreacyjnych, turystycznych, obsługowych i in. charakteryzują się malejącymi współczynnikami wagowymi przy wzroście obciążeń. Oznacza to długie okresy czasu pływania ze zmniejszonymi prędkościami. Jedyną wątpliwość budzą bardzo duże udziały pracy silników przy biegu jałowym. Jest to sprzeczne z ogólną zasadą, że statek przynosi dochód wtedy gdy płynie. Praca silnika z $N_{SG} = 0$ wymagałaby instalowania sprzęgieł rozłącznych, ponieważ każda obracająca się śruba napędowa wymaga dostarczania pewnej mocy. Śruba o skoku ustalonym ma zapotrzebowanie

mocą zgodne z krzywą śrubową, zaś o skoku nastawnym, pracująca przy $n=idem$ i ustawiona na skok zerowego naporu zapotrzebuje $\sim 0,25 \bar{N}_{SG}^{nom}$.



Rys. 6. Histogramy rozkładu obciążeń silników pracujących przy cyklach prób: E1, E4 i E5 [4-6]

Fig. 6. Histograms of distribution of engine loads upon tests: E1, E4 i E5 [4-6]

Literatura

- [1] Balcerski, A., (kier. proj.), *Raport: Badania identyfikacyjne rzeczywistych warunków pracy maszyn i urządzeń siłowni różnych typów morskich jednostek pływających*. Proj. KBN 9S60406907, Politechnika Gdańska Wydział Mechaniczny, Gdańsk 1996.
- [2] Balcerski, A., *Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji siłowni okrętowych*. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007.
- [3] Bocheński, D., (kier. proj.), *Baza danych Draga. Badania identyfikacyjne energochłonności i parametrów urabiania oraz transportu urobku na wybranych typach pogłębiarek i refulerów*. Proj. KBN 9T12C01718, Politechnika Gdańska Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Gdańsk 2000.
- [4] *Norma ISO 8178*.
- [5] Załącznik do VI Konwencji Marpol 73/78. *Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki oraz Kodeks Techniczny NO_x*. IMO, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2000.
- [6] *Okrętowe silniki spalinowe, Kontrola emisji tlenków azotu*. 2006. Przepisy Polski Rejestr Statków publ. Nr 69/P, Gdańsk 2006.