

CONDITIONS OF DRIVE AND DIAGNOSTIC MEASUREMENTS DURING SEA TESTS

Adam Charchalis

*Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny
Ul. Morska 83, 81-225 GDYNIA
tel. (058) 69 01 347
e-mail: achar @am.gdynia.pl*

Summary

The paper presents some problems of carrying out measurements of energetic characteristics and vessel's performance in the conditions of sea examinations. We present the influence of external and atmosphere conditions on the examination results and gas engine characteristics. We also discuss the manner of reducing the results of measurements to the standard conditions. We present the way of preparing propulsion characteristics and the way of its use in the exploitation on the basis of the marine gas turbine engine. The influence of surrounding conditions on the engine performance, the influence of weather conditions, in this the influence of the temperature of air intake, the influence of the change of pressure atmospheric, the influence of the change of the atmospheric humidity, the reduction of measured values for so called the standard-atmosphere, the verification of driving performances in operation, driving characterizations are presented in the paper.

Moreover the character of changes of the efficiency and the compressor work versus the compression temperature, The influence of changes of the atmospheric humidity intake on performances of the turbine-engine, Essential values of research of the driving ship system, driving performances are represented.

Keywords: *diagnostics, vessel's propulsion systems, measurements*

WARUNKI PRZEPROWADZANIA POMIARÓW NAPĘDOWYCH I DIAGNOSTYCZNYCH W CZASIE PRÓB MORSKICH

Streszczenie

Praca przedstawia problematykę przeprowadzania pomiarów energetycznych i osiąarów okrętu w warunkach badań morskich. Przedstawiono wpływ warunków zewnętrznych w tym warunków atmosferycznych na wyniki pomiarów i charakterystyki silnika. Omówiono sposób sprowadzania wyników pomiarów do warunków porównawczych. Przedstawiono metodykę sporządzania charakterystyk napędowych oraz sposób ich wykorzystania w eksploatacji na przykładzie okrętowych turbinowych silników spalinowych. Wpływ warunków zewnętrznych na charakterystyki silnika, wpływ warunków atmosferycznych, w tym wpływ temperatury powietrza dołotowego, wpływ zmiany ciśnienia atmosferycznego, wpływ zmiany wilgotności powietrza, przeliczanie wartości zmierzonych do tzw. atmosfery wzorcowej, weryfikacja charakterystyk napędowych w eksploatacji, charakterystyki napędowe są prezentowane w artykule.

Ponadto charakter zmian sprawności i pracy sprężarki w zależności od temperatury i sprężu, wpływ zmian wilgotności powietrza dołotowego na charakterystyki silnika turbinowego, wielkości charakteryzujące badania układu napędowego statku, Charakterystyki napędowe są zilustrowane.

Słowa kluczowe: *diagnostyka, napędy okrętowe, pomiary*

1. Uwagi wstępne

Pomiary wielkości związanych z elementami układu napędowego wykonywane na okrętach mają na celu określenie aktualnego stanu technicznego elementów napędu głównego lub ocenę parametrów ruchowych statku. Pomiary diagnostyczne powinny być wykonywane w sposób

ciągły, natomiast pomiary mające na celu opracowanie charakterystyk napędowych wykonywane są okresowo np. po zbudowaniu statku, przeprowadzeniu remontu elementów układu napędowego, określaniu klasy statku itp. Pomiary napędowe mają na celu ocenę prognozy napędowej dla nowobudowanego statku, czy też ocenę aktualnych osiągnięć statku będącego w eksploatacji. Bez względu na cel przeprowadzanych pomiarów należy zdawać sobie sprawę z tego, że statek zawsze pracuje w zmiennych warunkach i warunki te mogą mieć wpływ na jakość i wiarygodność pomiarów. Na zmianę warunków pływania wpływ mają parametry związane z:

- samym statkiem tj. stan załadowania, zużywanie zapasów (zmiana wyporności), zmiana stanu kadłuba, śrub, silników itp.

- warunkami hydrometeorologicznymi

- rejonem pływania.

Ocenę rzeczywistych charakterystyk napędowych w eksploatacji przeprowadza się podczas badań okrętu w morzu.

1.Wpływ warunków zewnętrznych na charakterystyki silnika

Silniki okrętowe pracują w silnie zmiennych warunkach. Zmiana warunków spowodowana jest ciągłą zmianą wyporności statku, a więc i jego zanurzeniem, zmianą rejonu pływania oraz zmianą warunków atmosferycznych. Warunki atmosferyczne mają wpływ na wyniki pomiarów wszelkiego rodzaju silników. Jednakże szczególnie istotny jest dla układów napędowych z turbinowymi silnikami spalinowymi. Wynika to z bardzo dużego strumienia masy powietrza zasysanego przez silnik, który może wynosić do $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Dla prowadzenia analiz porównawczych osiągnięć układu napędowego statku, czy też dla celów oceny diagnostycznej w czasie, niezbędnym jest uwzględnianie zmiany warunków pływania przy opracowywaniu wyników pomiarów.

1.1 Wpływ warunków atmosferycznych

Warunki atmosferyczne mają wpływ na osiągi każdego rodzaju silnika ,jednakże największy wpływ dotyczy turbinowych silników spalinowych. Turbinowe silniki spalinowe dla zapewnienia odpowiedniego przebiegu procesu roboczego wymagają dużych ilości powietrza. Współczynnik nadmiaru powietrza w silniku wynosi 3,6 –5. Odpowiada to jednostkowemu zapotrzebowaniu powietrza, wynoszącemu 18 – 25 kg/kWh. Konieczność sprężania dużej masy powietrza powoduje, że istotny jest wpływ zmiany warunków atmosferycznych na pracę silnika, warunki jego regulacji, osiągi itp. Istotny wpływ wywierają zmiany temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza, które powodują zmianę własności fizycznych tj gęstość, lepkość, ciepło właściwe, stała gazowa itp.

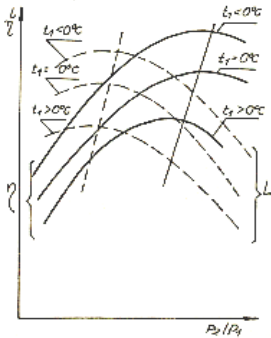
Zmiany osiągnięć silnika spowodowane warunkami atmosferycznymi mogą być znaczne i niekiedy mogą powodować niemożność zrealizowania odpowiednich osiągnięć silnika.

1.1.1.Wpływ temperatury powietrza dolotowego

Wahania temperatury powietrza dolotowego spowodowane są eksploatacją okrętów w różnych rejonach, a nawet strefach klimatycznych, różnych porach roku i dnia.

Standardowo przyjmuje się że temperatura otoczenia wynosi 288 K. Natomiast dla rejonu Morza Bałtyckiego można przyjąć, że temperatura otoczenia zmienia się w zakresie 238 –308 K. Tak duże wahania temperatury powodują wyraźną zmianę warunków pracy silnika, co musi być uwzględniane przy ocenie osiągnięć silnika pracującego w różnych warunkach. Wzrost temperatury powietrza dolotowego powoduje obniżenie strumienia masy powietrza z uwagi na zmniejszenie gęstości i w rezultacie obniżenie mocy silnika. Także zmianie ulegną inne wielkości charakteryzujące przebieg procesu roboczego silnika oraz sprawność sprężarki. W zakresie

obciążeń bliskich obliczeniowym, wzrost temperatury powietrza powoduje nieznaczny wzrost sprawności sprężarki. Spowodowane jest to wzrostem prędkości dźwięku i obniżeniem liczby Macha, co powoduje poprawienie warunków opływu, czyli zmniejszenie strat hydraulicznych. Przy obniżeniu temperatury powietrza dolotowego spadek sprawności sprężarki powoduje wzrost jednostkowego zużycia paliwa. Na rys 1. przedstawiono charakter zmian sprawności sprężarki i jej pracy efektywnej w zależności od temperatury powietrza dla różnych spręży. Z przedstawionych zależności wynika, że optymalny spręż zarówno dla sprawności sprężarki jak i jej pracy zmienia się liniowo. Zmiana tych wartości optymalnych różni się od siebie tym bardziej im różnica temperatur zwiększa się.



Rys. 1. Charakter zmian sprawności i pracy sprężarki w zależności od temperatury i spręży

Fig. 2. The character of changes of the efficiency and the compressor work versus the compression temperature

1.1.2. Wpływ zmiany ciśnienia atmosferycznego

Zmiany ciśnienia atmosferycznego, w porównaniu do temperatur są stosunkowo niewielkie. Zmiany ciśnienia powietrza mogą zachodzić w zakresie 96 –104 kPa. Względna zmiana ciśnienia odniesiona do ciśnienia standardowego (101,3 kPa) wynosi maksymalnie do 10 %. Z tego względu wpływ zmiany ciśnienia na charakter pracy silnika nie jest tak znaczący jak temperatury. Zmiana ciśnienia powietrza i wynikająca z tego zmiana gęstości powietrza na wlocie do silnika prowadzi do proporcjonalnej zmiany ciśnienia we wszystkich przekrojach kontrolnych silnika. Wzrost ciśnienia atmosferycznego powoduje zwiększenie masy powietrza i w rezultacie wzrost mocy silnika. Niezmienione pozostają natomiast temperatury, prędkości obrotowe, sprężę, sprawności i jednostkowe zużycie paliwa.

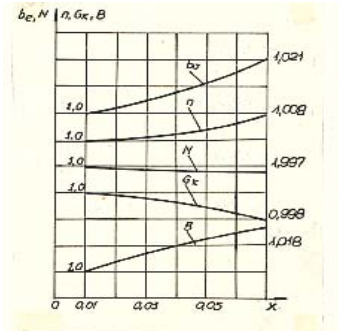
1.1.3. Wpływ zmiany wilgotności powietrza

Wilgotność powietrza może się zmieniać w bardzo szerokim zakresie od powietrza suchego do zawierającego nasyconą parę wodną. Wilgotność istotnie wpływa na osiągi pracy silników spalinowych. Związane jest to przede wszystkim ze zmianą masy powietrza oraz ze zmianą parametrów cieplnych powietrza tj. ciepła właściwego i stałej gazowej. Wzrost wilgotności powietrza prowadzi do wzrostu stałej gazowej i w rezultacie do zmniejszenia gęstości powietrza dolotowego. Powoduje to zmniejszenie masowego natężenia przepływu powietrza przez silnik. Wpływ zmniejszenia natężenia przepływu powietrza jest większy niż wzrost ciepła właściwego, co powoduje spadek mocy silnika. Powietrze dolotowe do silnika oprócz pary wodnej zawiera też krople wody, tzw aerozol morski. Zawartość wody i pary w odniesieniu do masy powietrza suchego określa stopień zawilżenia

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{ps}}$$

gdzie m_{ps} - masa powietrza suchego.

Na rys. 2. przedstawiono przykładową zmianę osiągow silnika przy zmianie stopnia zawiłzenia w zakresie 0,01 – 0,07.



Rys.2. Wpływ zmian wilgotności powietrza dolotowego na charakterystyki silnika turbinowego
Fig. 2. The influence of changes of the atmospheric humidity intake on performances of the turbine-engine

1.2. Przeliczanie wartości zmierzonych do tzw. atmosfery wzorcowej

Zmienne warunki atmosferyczne występujące podczas eksploatacji silników okrętowych wymagają sprowadzenia wyników badań do parametrów tzw. atmosfery wzorcowej ($p_0 = 101,325$ kPa i $T_0 = 288,15$ K). Zmianę temperatury, ciśnienia, prędkości obrotowej i mocy od warunków atmosferycznych prezentują następujące zależności :

-zredukowana moc silnika

$$P_{zr} = P_{zm} \frac{101325}{p_{ozm}} \sqrt{\frac{288,15}{T_{ozm}}},$$

-zredukowane ciśnienie

$$p_{zr} = p_{zm} \frac{101325}{p_{ozm}},$$

-zredukowana temperatura

$$T_{zr} = T_{zm} \frac{288,15}{T_{ozm}},$$

-zredukowana prędkość obrotowa

$$n_{zr} = n_{zm} \frac{288,15}{T_{ozm}},$$

gdzie:

P_{zr} , p_{zr} , T_{zr} , n_{zr} - dotyczy parametrów zredukowanych ,

P_{zm} , p_{zm} , T_{zm} , n_{zm} - dotyczy parametrów zmierzonych ,

T_0 , p_0 - parametry otoczenia .

2.0. Weryfikacja charakterystyk napędowych w eksploatacji

Ocenę rzeczywistych charakterystyk napędowych w eksploatacji przeprowadza się podczas badań okrętu w morzu. Dla pełnej oceny charakterystyk napędowych należałoby mierzyć:

- moment obrotowy na wałach napędowych, napór śrub, prędkość obrotową wałów, prędkość okrętu oraz zużycie paliwa przez poszczególne silniki.

Badania napędowe w morzu przeprowadzane są w różnych, niepowtarzalnych warunkach zewnętrznych różniących się zasadniczo od warunków umownych tzn. tych dla których przeprowadzane są badania modelowe lub liczone są charakterystyki napędowe. W tabeli 1 przedstawiono wielkości wejściowe związane ze statkiem i z warunkami morskimi oraz wielkości pomiarowe związane z oceną diagnostyczną i napędową silników napędu głównego statku. Dla prawidłowej oceny wiarygodności charakterystyk napędowych uzyskanych podczas prób w morzu istotnym jest oszacowanie przedziałów niepewności pomiarowych mierzonych i wyliczonych wielkości. Spośród mierzonych wielkości największa niepewność pomiarowa występuje przy pomiarze naporu śrub oraz momentu obrotowego.

Na wielkość niepewności pomiarowej momentu obrotowego oraz naporu mierzonych metodami tensometrycznymi w pierwszym rzędzie wpływ ma niepewność oceny modułu sprężystości materiału wału, która wynosi około 4% oraz błąd osiowania naklejanych tensometrów przy pomiarze naporu.

Tabela 1. Wielkości charakteryzujące badania układu napędowego statku
Table 1. Essential values of research of the driving ship system

Wielkości wejściowe		Wielkości mierzone	
Parametry statku	Warunki badań	Parametry napędowe	Parametry diagnostyczne
Wyporność	Parametry otoczenia: temperatura, ciśnienie	Prędkość statku	Prędkość obrotowa zespołów silnika
Zanurzenie	Stan morza	Prędkość obrotowa	Przebieg procesu roboczego
Przegłębienie	Siła wiatru	Moment obrotowy na wale	Ciśnienie czynnika roboczego
Stan kadłuba	Kierunek wiatru i fali	Napór śrub	Temperatura czynnika roboczego
Stan śruby	Prąd morski	Moc napędu	Ciśnienie paliwa i oleju
Stan silnika	Głębokość akwenu	Zużycie paliwa	Zużycie paliwa i oleju
Zadana prędkość pływania	Kurs statku		

2. Charakterystyki napędowe

Dla sporządzenia charakterystyk napędowych niezbędnym jest znajomość:

- Charakterystyki oporowej kadłuba $R = f(v)$.
- Charakterystyk śrub swobodnych.

Charakterystyki hydrodynamiczne śrub w postaci $K_T, K_Q, \eta_p = f(J)$,

gdzie: współczynnik naporu

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4},$$

T – napór śruby ,

n – prędkość obrotowa śruby ,

D – średnica śruby

współczynnik momentu

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5},$$

Q – moment obrotowy

ρ - gęstość wody

η_p – sprawność śruby swobodnej

$$\eta_p = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi},$$

$$J - \text{współczynnik posuwu} \quad J = \frac{v_p}{Dn},$$

v_p – prędkość postępową śruby.

- Charakterystyk silników napędowych $N = f(n)$
- Charakterystyki elementów przeniesienia momentu obrotowego: sprawność linii wałów η_{lw} , sprawność przekładni η_r .
- Współczynniki charakteryzujące współpracę kadłuba i śruby.

$$t - \text{współczynnik ssania} \quad t = 1 - \frac{R}{T},$$

w – współczynnik strumienia nadążającego

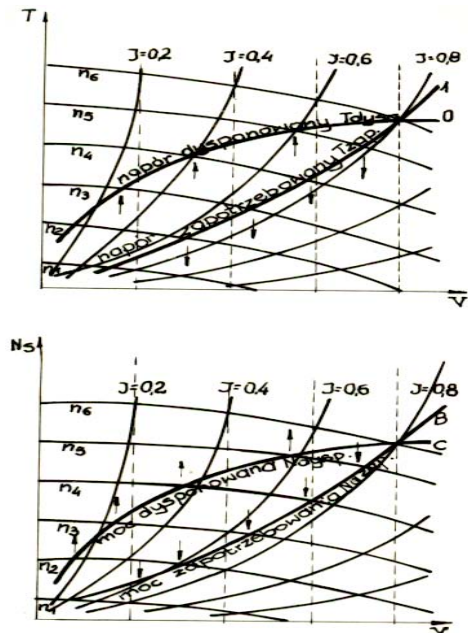
$$w = 1 - \frac{v_p}{v}.$$

Podstawą do sporządzenia charakterystyk napędowych jest opracowanie w oparciu o charakterystyki hydrodynamiczne śruby swobodnej jej pola możliwej pracy. Pole to sporządza się w układach współrzędnych $T - n$, $Q - n$, $N - n$ z zaznaczeniem linii stałych wartości współczynników posuwu J oraz prędkości obrotowej śruby n . Następnie nanosi się na odpowiednie wykresy charakterystyki oporowe oraz charakterystyki silnika napędowego odniesione do tych samych miejsc pomiarowych np. stożek śruby lub sprzęgło wału wyjściowego silnika dla momentu obrotowego i mocy oraz kadłub statku lub stożek śruby dla charakterystyki oporowej i parametrów śruby. Sprowadzenie wyników pomiarów do odpowiedniego miejsca jest istotne w celu uwzględnienia sprawności elementów pośredniczących w przekazywaniu momentu obrotowego oraz sprawności kadłuba i śrub napędowych.

Charakterystyki napędowe dają pełny obraz prawidłowości doboru elementów układu napędowego i umożliwiają przeprowadzenie oceny własności ruchowych statku. Dla okrętów z kombinowanymi układami napędowymi, charakterystyki napędowe oraz sposób ich przedstawienia znacznie się komplikują. Spowodowane jest to tym, że:

- kombinowany układ napędowy umożliwia szereg sposobów wykorzystania silników napędowych; np. praca samych silników marszowych, samych szczytowych, czy też ich łączna praca;
- duże prędkości pływania powodują wysokie obciążenie śrub; z reguły śruby pracują w zakresie silnie rozwiniętej kawitacji, czy też superkawitacji, stąd w charakterystykach hydrodynamicznych śrub oprócz współczynnika posuwu należy uwzględnić liczbę kawitacyjną.

Dobre efekty uzyskuje się przedstawiając charakterystyki napędowe układów kombinowanych jako indywidualne charakterystyki dla każdego rodzaju silników.



Rys 3. Charakterystyki napędowe

Fig. 3. Driving performances

Na rys 3 przedstawiono przykładową charakterystykę napędową dla klasycznego napędu statku

4. Wnioski końcowe

Dla prawidłowej oceny wiarygodności charakterystyk napędowych uzyskanych podczas prób w morzu istotnym jest oszacowanie przedziałów niepewności pomiarowych mierzonych i wyliczonych wielkości. Spośród mierzonych wielkości największa niepewność pomiarowa występuje przy pomiarze naporu śrub oraz momentu obrotowego.

Przeprowadzane badania napędowe w warunkach rzeczywistych, na wyniki których istotny wpływ mają warunki zewnętrzne tzn. środowisko badań oraz szeroko rozumiany stan kadłuba i śruby mogą pozwolić na oszacowanie stanu technicznego całego okrętu tzn. kadłuba i układu napędowego. Wykonywane okresowo badania pozwalają określić wzajemne relacje pomiędzy zużyciem paliwa, momentem obrotowym, prędkością obrotową oraz prędkością okrętu. I te relacje mogą być wykorzystywane w bieżącej eksploatacji dla oceny stanu poszczególnych elementów układu napędowego przy wykorzystaniu teoretycznych charakterystyk napędowych obliczonych dla śruby i kadłuba adekwatnego. W badaniach diagnostycznych każdorazowo należy brać pod uwagę stan załadowania statku, a dla okrętów wojennych stan zapasów w tym zapas paliwa, który stanowi duży udział w masie całkowitej statku oraz warunki atmosferyczne i hydrometeorologiczne wykonywania pomiarów.

Bibliografia

- [1] Charchalis, A., *Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych*. AMW Gdynia 1991.
- [2] Charchalis, A., *Podstawy diagnozowania turbinowego układu napędowego fregaty*. SILWOJ Jurata 2001.
- [3] Charchalis, A., *Nadzór eksploatacyjny siłowni z turbinowymi silnikami spalinowymi* PROBLEMY EKSPLOATACJI nr 4/2001.
- [4] Charchalis, A., *Opory i pędniki okrętów wojennych*, AMW Gdynia 2001.
- [5] Charchalis, A., *Wykorzystanie charakterystyk napędowych układów ruchowych okrętów szybkich*. XXX Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN Węgierska Górka 2003.
- [6] Charchalis, A., *Diagnozowanie układów napędowych okrętów w oparciu o pomiar parametrów eksploatacyjnych* XXXI Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN Węgierska Górka 2004.
- [7] Charchalis, A., *Multi Symptoms System of Diagnosing of Marine Gas Turbines*. III International Congress of Technical Diagnostics, Poznan 2004.
- [8] Charchalis, A., *Warunki przeprowadzania i weryfikacji oceny diagnostycznej na okręcie*. Diagnosta 2005.
- [9] Charchalis, A., *Knowledge acquisition for didactic improvement in exploitation of ship power plants*. UCEE Gdynia 2005.
- [10] Charchalis, A., *Conditions of carrying out and verification of diagnostic evaluation in a vessel*. UCEE Bangkok 2005.

