

WARUNKI PRZEPROWADZANIA I WERYFIKACJI OCENY DIAGNOSTYCZNEJ NA OKRĘCIE

Adam CHARCHALIS

Akademia Morska Gdynia, Wydział Mechaniczny

ul Morska 81-87, 81-225 Gdynia, tel. (+58) 69 01 347, achar @am.gdynia.pl

Streszczenie

Praca przedstawia problematykę przeprowadzania pomiarów energetycznych i osiąarów okrętu w warunkach badań morskich. Przedstawiono wpływ warunków zewnętrznych na zmianę charakterystyk oporowych kadłuba i śruby oraz na przykładzie turbinowego silnika spalinowego wpływ warunków atmosferycznych na wyniki pomiarów i charakterystyki silnika. Omówiono sposób sprowadzania wyników pomiarów do warunków porównawczych. Przedstawiono sposób sporządzania charakterystyk napędowych oraz analizę niepewności pomiarowej dla pomiaru momentu obrotowego

Słowa kluczowe: diagnostyka, napędy okrętowe, pomiary.

CONDITIONS OF CARRYING OUT AND VERIFICATION OF DIAGNOSTIC EVALUATION IN A VESSEL

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 conditions in the change of vessel's hull resistance and propeller characteristics as well as the influence of weather conditions in the results of examinations and characteristics of gas turbine engine. 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 analysis of examination uncertainty for the measurement of torque.

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

1. UWAGI WSTĘPNE

Pomiary 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 itp. Pomiary wykonywane na okręcie mają na celu ocenę prognozy napędowej dla nowobudowanego statku, czy też ocenę aktualnych parametrów ruchowych statku będącego w eksploatacji. Bez względu na cel przeprowadzanych pomiarów należy zdawać sobie sprawę z tego, że statek zawsze pracuje w innych 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 [2].

Dla pełnej oceny charakterystyk napędowych należałoby mierzyć: moment obrotowy na wałach napędowych; napór śrub; prędkość obrotową wałów, prędkość okrętu i zużycie paliwa przez poszczególne silniki. Na rys. 1 przedstawiono blokowy model okrętu jako obiektu badań napędowych w morzu.

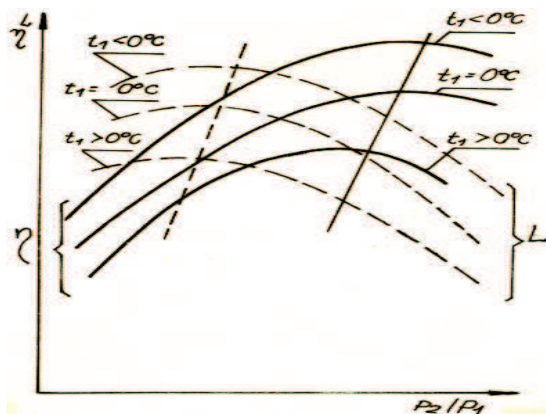
też postawienie niewłaściwej diagnozy z uwagi na nieporównywalność warunków pomiarów.

4.1.1. 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 ulegają 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 4 przedstawiono charakter zmian sprawności sprężarki i jej pracy efektywnej w zależności od temperatury powietrza dla różnych spręż. Z przedstawionych zależności wynika, że optymalny spręż zarówno dla sprawności sprężarki jak i jej pracy zmienia się liniowo.



Rys. 4. Charakter zmian sprawności i pracy sprężarki w zależności od temperatury i sprężu

Zmiana tych wartości optymalnych różni się od siebie tym bardziej im różnica temperatur zwiększa się.

4.1.2. 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, spręż, sprawności i jednostkowe zużycie paliwa.

4.1.3. 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 silników spalinowych. Związane jest to przede wszystkim ze zmianą masy powietrza oraz ze zmianą parametrów cieplnych powietrza takich jak ciepło właściwe i stała gazowa. 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 w postaci tzw. aerozolu morskiego. Zawartość wody i pary w odniesieniu do masy powietrza suchego określa stopień zawilżenia

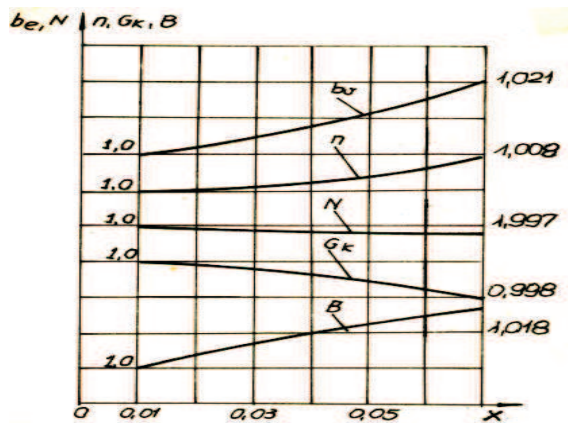
$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{ps}}$$

gdzie m_{ps} - masa powietrza suchego.

Na rys 5. przedstawiono przykładową zmianę osiągnięć silnika przy zmianie stopnia zawilżenia w zakresie 0,01 – 0,07

4.2. Przeliczanie wartości zmierzonych do tzw atmosfery wzorcowej

Zmienne warunki atmosferyczne występujące podczas eksploatacji silników okrętowych wymagają sprowadzenia wyników badań do parametrów tzw. atmosfery wzorcowej (po = 101,325 kPa i To = 288,15 K).



Rys.5. Wpływ zmian wilgotności powietrza dolotowego na charakterystyki silnika turbinowego

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

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

-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_o , p_o - parametry otoczenia

5. CHARAKTERYSTYKI NAPĘDOWE

Dla sporządzenia charakterystyk napędowych niezbędnym jest znajomość:

- charakterystyki oporowej kadłuba $R = f(v)$.
- charakterystyk śrub swobodnych
- charakterystyk silników napędowych
- charakterystyki elementów przeniesienia momentu obrotowego

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

ρ – gęstość wody

η_p – sprawność śruby swobodnej $\eta_p = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}$

J – współczynnik posuwu $J = \frac{v_p}{Dn}$

v_p – prędkość postępową śruby

Współczynniki charakteryzujące współpracę kadłuba i śruby:

t – współczynnik ssania $t = 1 - \frac{R}{T}$

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

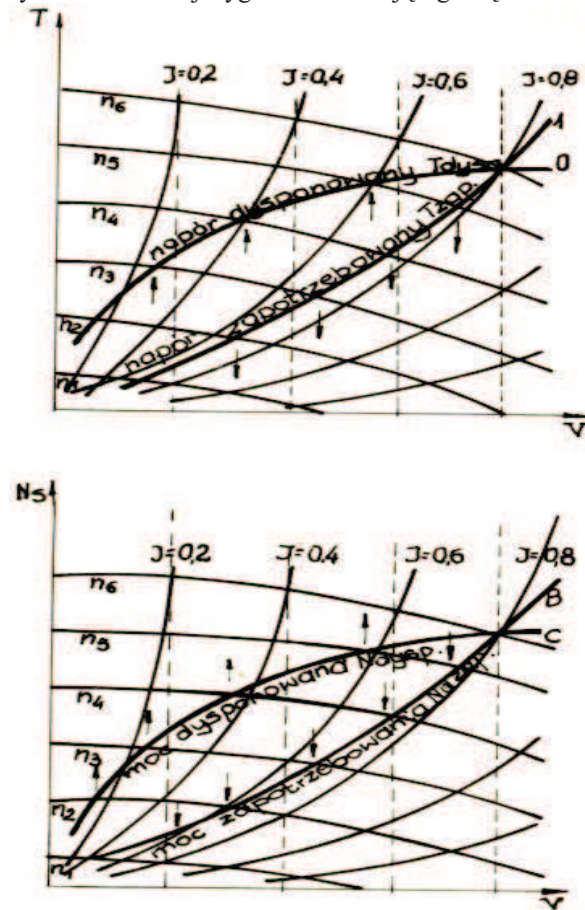
hydrodynamicznych śrub oprócz współczynnika posuwu należy uwzględnić liczbę kawitacyjną.

Dobre efekty uzyskuje się przedstawiając charakterystyki napędowe układów kombinowanych jako indywidualne [4].

Na rys 6 przedstawiono przykładową charakterystykę napędową dla klasycznego napędu 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 największą niepewność pomiarowa występuje przy pomiarze naporu śrub oraz momentu obrotowego.

Obie wielkości mierzone są metodami tensometrycznymi z zastosowaniem bezstykowego systemu transmisji sygnału z obracającego się wału.



Rys. 6. Charakterystyka napędowa statku

Na wielkość niepewności pomiarowej momentu obrotowego oraz naporu w pierwszym rzędzie wpływ ma niepewność oceny modułu sprężystości materiału wału G, która wynosi do 4% oraz błąd wynikający z niezachowania równoległości położenia w stosunku do osi wału naklejanych tensometrów, przy pomiarze naporu śrub.

$$\frac{\partial Q}{Q \partial G} = \frac{1}{G} \frac{\partial Q}{\partial G} = \frac{3}{D} \frac{\partial Q}{Q \partial \varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}$$

Niepewność pomiaru momentu obrotowego mierzonego metodą tensometryczną składa się z dwóch składowych częściowych.

-u₁ niepewności standardowej przyrządu pomiarowego

-u₂ niepewności standardowej stałej dla wału α_T.

$$u_Q^2 = \left(\frac{u_Q}{Q}\right)^2 = \left(\frac{u_G}{G}\right)^2 + \rho \left(\frac{u_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{u_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2$$

Niepewność przyrządu pomiarowego zależy od rodzaju stosowanego miernika. Do pomiarów momentu obrotowego często stosuje się mierniki firmy Philips lub Hottinger. Charakteryzują się one granicznym błędem pomiaru 0,5%, stąd niepewność pomiarowa przy założeniu równomiernego rozkładu błęd pomiaru wynosi

$$u_1 = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,289\%$$

Do wzorcowania tensometrycznego układu pomiarowego wykorzystywany jest opornik kalibrowany R_{cal} o błędzie granicznym 0,01%. Mierzone naprężenia wału ε ze wzorcem

$$\text{związane są zależnością: } \varepsilon = \frac{1}{4K_t} \frac{R_t}{R_t + R_{cal}}$$

gdzie: R_t - rezystancje tensometrów

K_t - stałe tensometru.

Wpływ wzorca na niepewność pomiarową naprężeń

ε wyznacza się wg zależności jak dla pomiarów złożonych

$$\frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon \partial R_t} = \frac{1}{R_t}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon \partial K_t} = -\frac{1}{K_t}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon \partial R_2} = -\frac{1}{R_2}$$

$$\left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 = \left(\frac{V_{R_t}}{R_t}\right)^2 + \left(\frac{-U_k}{K_t}\right)^2 + \left(\frac{-V_{R_2}}{R_2}\right)^2$$

Przy założeniu błędów granicznych wartości podstawowych R_t → ±0,2%, K_t → ±0,5% oraz R₂ → ±0,01%, niepewność wzorcowania naprężenia wału wynosi 0,314%. Obliczenie momentu obrotowego przeprowadza się w oparciu o zmienną wartość naprężeń w wale

$$Q = \alpha_T \varepsilon$$

gdzie

α_T - stała dla danego wału

$$\alpha_T = \frac{4GJ}{D} \quad J = \frac{\pi D^4}{32}$$

Niepewność pomiarowa momentu obrotowego liczona jak dla pomiarów złożonych oraz przy założeniu błędów granicznych

dla G 3s = 3,45 % stąd u_G/G = 1,15%

dla D ±0,1 mm i D > 200 mm i u_{D/D} = 0,029%

dla ε $u_\varepsilon/\varepsilon = 0,314\%$
wynosi: 1,2%

Największy udział w niepewności pomiarowej ma błąd oszacowania modułu sprężystości G . Błąd ten można wyeliminować poprzez przeprowadzenie badań wytrzymałościowych stali stosowanych na wały lub wykorzystanie specjalnej wycechowanej wstawki pomiarowej w odcinku linii wałów.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzane badania układu ruchowego okrętu 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 załadunku 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.

LITERATURA

- [1] Charchalis A., Diagnostowanie okrętowych silników turbinowych wyd. AMW Gdynia 1991.
- [2] Charchalis A., Nadzór eksploatacyjny siłowni z turbinowymi silnikami spalinowymi PROBLEMY EKSPLOATACJI nr 4/2001
- [3] Charchalis A., Opory okrętów wojennych i pędniki okrętowe wyd. Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni 2001.
- [4.] Charchalis A. Wykorzystanie charakterystyk napędowych układów ruchowych okrętów szybkich. XXX Symposium DIAGNOSTYKA MASZYN Węgierska Górka 2003
- [5] Charchalis A. „Diagnostowanie układów napędowych okrętów w oparciu o pomiar parametrów eksploatacyjnych XXXI Symposium DIAGNOSTYKA MASZYN Węgierska Górka 2005.



Adam CHARCHALIS, ur. w 1944 r. w Przemyślu. Studia I stopnia ukończył w 1968 r. w Wyższej Szkole Marynarki Wojennej, a studia II stopnia w 1971r. na Wydziale Okrętowym Politechniki Gdańskiej. W latach 1968 - 1971 był oficerem mechanikiem na trałowcu ORP „Krogulec”. Od 1971r. pracował w Wyższej Szkole Marynarki Wojennej, obecnie Akademia Marynarki Wojennej, pełniąc od 1979r. obowiązki zastępcy Komendanta Instytutu Konstrukcji i Napędów Okrętowych, a od 1990r. do 2003r. Komendanta tegoż Instytutu. W latach 1994 - 2003 pełnił obowiązki dziekana Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej. Od 1999r. prof. zwyczaj. Akademii Morskiej w Gdyni. Doktorat w 1978r., habilitacja 1984r., tytuł profesora 1994r. Zainteresowania badawcze i dydaktyczne to „Siłownie” i „Napędy okrętowe”, „Projektowanie okrętów”, „Turbinowe silniki spalinowe” oraz „Diagnostyka maszyn okrętowych”. Stworzył system diagnostowania układów napędowych okrętów z turbinowymi silnikami spalinowymi, który został wdrożony na okrętach Marynarki Wojennej. Autor 3 monografii, 8 podręczników i ponad 250 prac. Promotor 13 zakończonych przewodów doktorskich.