

Bogdan Pojawa

Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów
81-103 Gdynia, ul. J. Śmidowicza 69
e-mail: b.pojawa@amw.gdynia.pl

Małgorzata Holdowska

Jednostka Wojskowa 1749
70-904 Szczecin, ul. Wojska Polskiego 250
e-mail: m.holdowska@wp.pl

**WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK
EKSPLOATACYJNYCH
OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA
SPALINOWEGO LM2500**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań wstępnych dotyczących opracowania charakterystyk prędkościowych obiektu badań w stanach pracy ustalonej. Obiektem badań były silniki napędu głównego fregaty typu Oliver Hazard Perry będącej na wyposażeniu Marynarki Wojennej RP. Badania wstępne przeprowadzono podczas wyjścia okrętu w morze, w warunkach siłowni okrętowej. Podczas badań silniki zostały poddane jednoczesnemu i równomiernemu obciążeniu. W celu umożliwienia porównywania charakterystyk eksploatacyjnych badanych silników, jak również odniesienia ich do różnych warunków atmosferycznych wyniki pomiarów, na podstawie których je wyznaczono, zredukowano do tzw. warunków atmosfery wzorcowej. Dla przedmiotowych charakterystyk, z wykorzystaniem analizy statystycznej, dokonano wyznaczenia zależności aproksymacyjnych.

Słowa kluczowe:

okrętowy turbinowy silnik spalinowy, charakterystyki eksploatacyjne, okrętowy układ napędowy.

WSTĘP

W praktyce eksploatacyjnej siłowni okrętowych, w tym również okrętowych układów napędowych, istnieje potrzeba ich analiz, porównywania różnych rozwiązań oraz oceny stanu technicznego. Analizy prowadzone są najczęściej w aspekcie energetycznym, eksploatacyjnym i ekonomicznym. Wskaźniki energetyczne, na przykład sprawność, jednostkowe zużycie paliwa, moce i momenty obrotowe, decydują o prędkości pływania okrętu, jego zasięgu itp. Wskaźniki eksploatacyjne siłowni okrętowej wskazują na jej niezawodność, możliwość przeciążania silników napędu głównego, zdolność wykonywania manewrów, dopuszczalne okresy międzyremontowe itp. Natomiast ekonomika pracy siłowni okrętowej występuje zazwyczaj na drugim planie, z tego względu, że dany okręt przewidziany jest do wykonywania ściśle określonych zadań [1, 5].

Eksploatacja okrętowych układów napędowych z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi charakteryzuje się odmienną specyfiką eksploatacji niż z okrętowymi tłokowymi silnikami spalinowymi. Związane jest to z odmienną konstrukcją i budową, realizacją innego obiegu termodynamicznego, realizacją w sposób ciągły wewnętrznych przemian energetycznych oraz dużym zakresem zmienności wartości parametrów eksploatacyjnych, w szczególności prędkości obrotowych. W najbardziej ogólnym pojęciu okrętowy turbinowy silnik spalinowy składa się z wytwornicy spalin oraz wolnej turbiny napędowej. Wytwornica spalin służy do wytwarzania czynnika roboczego (spalin) o określonych parametrach, natomiast wolna turbina napędowa zapewnia napęd odbiornikowi energii. Między wirnikami wytwornicy spalin i wolnej turbiny napędowej nie ma żadnego sprzężenia mechanicznego, występuje natomiast sprzężenie termogazodynamiczne. Z tego względu w kanałach przepływowych pomiędzy wytwornicą spalin a wolną turbiną napędową występuje akumulacja czynnika roboczego, która przy zbyt dużych obciążeniach wolnej turbiny napędowej (towarzyszy temu zmniejszenie jej prędkości obrotowej) powoduje powstawanie niepożądanych procesów, mogących doprowadzić do uszkodzenia silnika (zjawisko pompażu). Podsumowując, można stwierdzić, że powyższe sprzężenie termogazodynamiczne w największym stopniu wpływa na odmienną specyfikę eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych. W Marynarce Wojennej RP występują obecnie dwa rodzaje okrętów wyposażonych

w układy napędowe z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi. Są to korewety raketowe typu Tarantul oraz fregaty raketowe typu Olivier Hazard Perry [5].

W procesie eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych niezbędna jest znajomość ich parametrów pracy w zależności od obciążenia, wynikającego z prędkości pływania okrętu. Powyższe zależności przedstawiają charakterystyki eksploatacyjne. Pozwalają one na określenie obszarów ich zastosowań, analizę osiągnięć oraz ekonomiczność pracy [1, 5]. W przypadku okrętowych turbinowych silników spalinowych charakterystyki są wynikiem współpracy maszyn przepływowych będących głównymi elementami silnika. Należą do nich: sprężarka, komora spalania oraz turbina [5].

W artykule przedstawiono identyfikację obiektu badań oraz wyniki badań wstępnych dotyczących opracowania charakterystyk prędkościowych okrętowego turbinowego silnika spalinowego LM2500, wchodzących w skład układu napędowego fregaty typu Oliver Hazard Perry, w stanach pracy ustalonej.

KLASYFIKACJA CHARAKTERYSTYK OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Charakterystykę eksploatacyjną najprościej można zdefiniować jako graficzne lub analityczne przedstawienie zależności podstawowych wielkości określających osiągi silnika, a także parametrów stanu czynnika roboczego w jego charakterystycznych przekrojach od wielkości określających warunki pracy silnika współpracującego z określonym odbiornikiem energii [2, 4, 5].

Stan energetyczny silnika (wytwornicy spalin) zależy od wartości parametrów energetycznych uzależnionych od położenia dźwigni sterowania silnikiem (strumieniem paliwa) i wpływających bezpośrednio na moc silnika (strumień entalpii spalin). W przypadku okrętowego turbinowego silnika spalinowego dwuwirnikowego takim parametrem jest prędkość obrotowa wirnika wytwornicy spalin, natomiast w przypadku silnika trójwirnikowego (z wolną turbiną napędową i dwuwirnikową wytwornicą spalin) najczęściej jest to prędkość obrotowa wirnika wysokiego ciśnienia. Do podstawowych parametrów energetycznych charakteryzujących pracę każdego silnika spalinowego należą: moc efektywna (użyteczna), moment

obrotowy, prędkości obrotowe wirników silnika oraz jednostkowe zużycie paliwa. Parametry te w zależności od stanu energetycznego silnika mogą przyjmować wartości: maksymalne, nominalne, eksploatacyjne oraz minimalne [1, 4, 5, 7]. Ponadto można wyróżnić inne dodatkowe parametry i wielkości charakteryzujące pracę silnika. W przypadku okrętowych turbinowych silników spalinowych należą do nich:

- temperatura i ciśnienie bezwzględne czynnika roboczego w charakterystycznych przekrojach odpowiadających węzłowym punktom realizacji obiegu termodynamicznego silnika; temperatura i ciśnienie bezwzględne mogą być statyczne lub całkowite (spiętrzenia);
- strumienie masy powietrza, paliwa i spalin;
- spręż sprężarki.

Podczas pracy okrętowych turbinowych silników spalinowych można wyróżnić następujące stany energetyczne:

- *u s t a l o n e*, w zakresie od mocy minimalnej (potocznie nazywanej „biegiem jałowym) do mocy maksymalnej, w tym jako szczególnie: maksymalny, nominalny (obliczeniowy), mocy częściowych (eksploatacyjnych), mocy minimalnej;
- *n i e u s t a l o n e*, do których należą: rozruch lub odstawienie silnika oraz akceleracja i deceleracja.

W związku z powyższym można dokonać klasyfikacji charakterystyk eksploatacyjnych okrętowych turbinowych silników spalinowych na [2, 5]:

- statyczne:
 - prędkościowe,
 - obciążeniowe,
 - współpracy silnika z odbiornikiem energii;
- dynamiczne (przejściowe):
 - rozruchowe,
 - odstawienia silnika,
 - akceleracji i deceleracji;
- ogólne lub uniwersalne (wieloparametrowe).

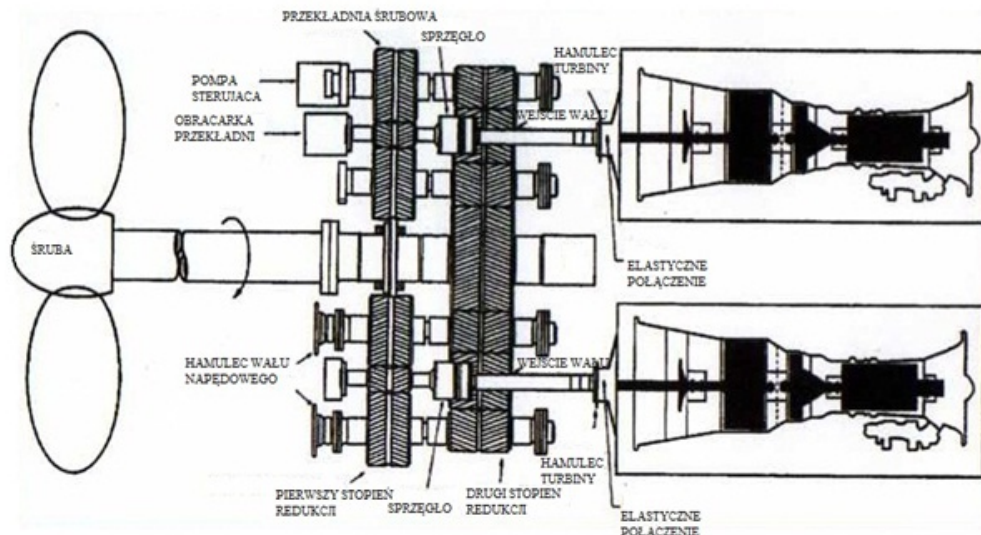
W artykule przedstawiono zależności funkcyjne charakterystyk prędkościowych rozpatrywanego obiektu badań, które przedstawiają zależność wartości parametrów pracy silnika od prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin, przy zachowaniu prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej wynikającej ze współpracy z odbiornikiem energii (śruby napędowej o skoku nastawnym). Dysponując charakterystykami prędkościowymi, można wyznaczyć na ich podstawie charakterystyki obciążeniowe oraz współpracy silnika z odbiornikiem energii.

BADANIA WSTĘPNE

Badania wstępne miały na celu pomiar parametrów pracy rozpatrywanego obiektu badań w aspekcie wyznaczenia zależności funkcyjnych jego charakterystyk prędkościowych. Obiektem badań były okrętowe turbinowe silniki spalinowe LM2500, będące silnikami napędu głównego fregaty rakietowej typu Oliver Hazard Perry. Badania przeprowadzono na jednej z fregat występujących w Marynarce Wojennej RP, w rzeczywistych warunkach pracy siłowni okrętowej podczas wyjścia okrętu w morze. Zostały one przeprowadzone dla ustalonych stanów energetycznych, zadawanych prędkościami obrotowymi wirnika wytwornicy spalin, w zakresie od minimalnego do nominalnego obciążenia obiektu badań. Zmianę obciążeń silników przeprowadzono zgodnie z programem sterowania układem napędowym, który w zależności od nastawionego skoku śruby dobiera optymalne nastawy strumienia paliwa oraz kąt ustawienia łopatek kierowniczych na pierwszych sześciu stopniach sprężarki osiowej silników.

Pomiarów parametrów pracy dokonano na dwóch jednocześnie pracujących i równomiernie obciążonych silnikach. Do pomiarów wykorzystano przenośny system pomiarowo-rejestrujący Multichannel Recorder TYPU 908416161C oraz dodatkowo dokonano odczytu i zapisu mierzonych parametrów pracy ze wskaźników znajdujących się na pulpicie głównym w centrali sterowania siłownią. Na poszczególnych ustalonych obciążeniach dokonano pomiaru parametrów pracy w czasie 60 sekund z częstotliwością próbkowania 2 Hz, a następnie uśredniono. Przeprowadzenie pomiarów poprzedzone było wykonaniem kalibracji poszczególnych torów pomiarowych wraz z określeniem ich niepewności pomiarowych.

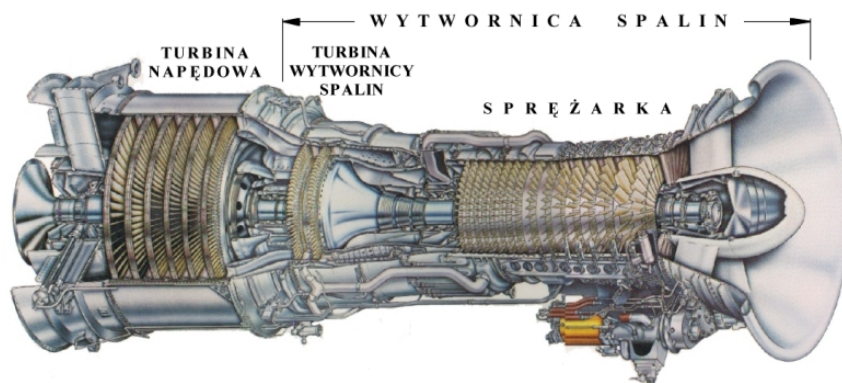
Układ napędowy fregaty raketowej typu Oliver Hazard Perry (rys. 1.) składa się z trzech podstawowych elementów: dwóch silników napędu głównego LM2500 wraz z modułem automatyki, przekładni redukcyjnej i linii wału ze śrubą napędową nastawną [7].



Rys. 1. Schemat układu napędowego fregaty raketowej typu Oliver Hazard Perry

Źródło: *Instrukcja obsługi układu napędowego fregaty FFG9.*

Silnikami napędu głównego są dwa okrętowe turbinowe silniki spalinowe LM2500 produkcji General Electric. Silnik LM2500 (rys. 2.) jest silnikiem o konstrukcji dwuwirnikowej, z osiowym przepływem czynnika roboczego. Składa się z dwóch zasadniczych części: wytwornicy spalin i wolnej turbiny napędowej. Wytwornica spalin składa się z 16-stopniowej sprężarki osiowej, komory spalania typu pierścieniowego wyposażonej w trzydzieści wtryskiwaczy oraz dwustopniowej turbiny wytwornicy spalin. Za wytwornicą spalin występuje 6-stopniowa wolna turbina napędowa połączona z wytwornicą spalin w sposób termogazodynamiczny [7].



Rys. 2. Przekrój okrętowego turbinowego silnika spalinowego LM2500

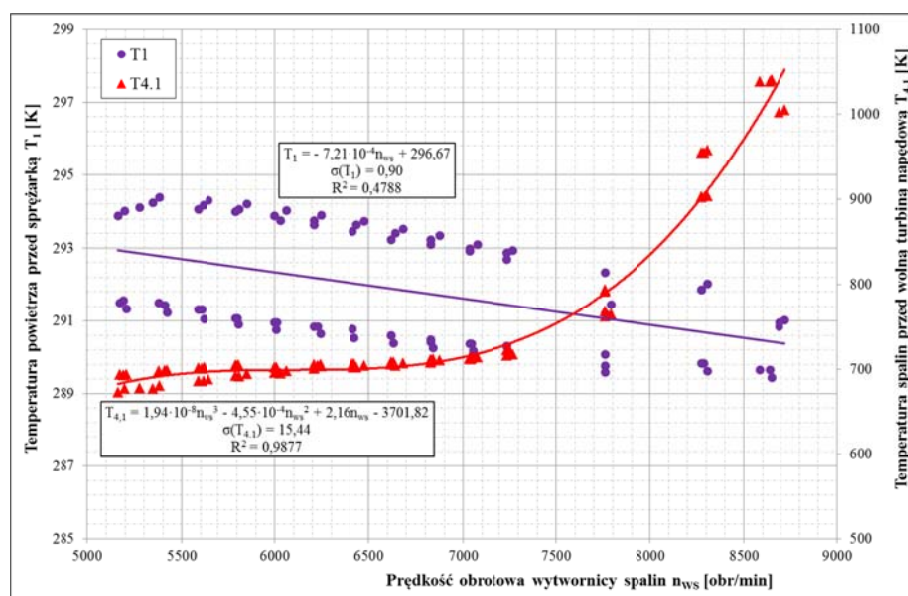
Źródło: Instrukcja obsługi układu napędowego fregaty FFG9.

WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

Dysponując wynikami pomiarów parametrów pracy obiektu badań, na poszczególnych zakresach pracy ustalonej, sprowadzono je do jednostek układu SI lub ich wielokrotności oraz uwzględniono ciśnienie otoczenia przy wyznaczaniu ciśnień bezwzględnych. Następnie przeprowadzono analizę merytoryczną wyników pomiarów. Dotyczyła ona w szczególności weryfikacji wyników pomiarów pod względem zgodności z zachodzącymi zjawiskami fizycznymi w rozpatrywanym obiekcie badań, z uwzględnieniem podstaw teoretycznych i zasad jego eksploatacji oraz odrzuceniem pomiarów z błędami grubymi [3, 6]. W celu umożliwienia porównywania charakterystyk prędkościowych badanych silników, jak również odniesienia ich do różnych warunków atmosferycznych, wyniki pomiarów, na podstawie których je wyznaczono, zredukowano do tzw. warunków atmosfery wzorcowej. Warunki atmosfery wzorcowej określone są następującymi parametrami stanu: ciśnieniem barometrycznym $p_{0WZ} = 101325 \text{ Pa}$ oraz temperaturą bezwzględną $T_{0WZ} = 288,15 \text{ K}$ [2, 5].

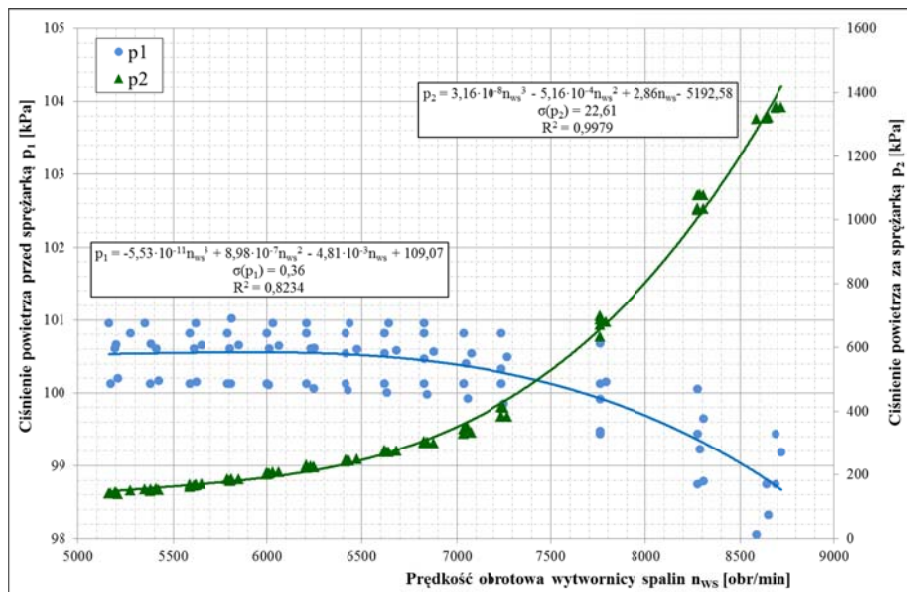
Na podstawie wyników pomiarów dokonano wyznaczenia charakterystyk prędkościowych rozpatrywanego obiektu badań. Do ich wyznaczenia wykorzystano wyniki pomiarów zarejestrowane na obu silnikach. W dalszej kolejności dla otrzymanych charakterystyk wyznaczono zależności aproksymujące. Zastosowano do tego analizę statystyczną. Stanowi ona proces przetwarzania danych (wyników

pomiarów wykonanych zgodnie z przyjętym programem doświadczenia) w celu wykrywania prawidłowości w badanych zjawiskach i ich interpretowania za pomocą metod statystyki matematycznej. Umożliwia tym samym wyznaczenie funkcji obiektu badań, która może stanowić również jego model matematyczny. Na podstawie wyników analizy statystycznej uzyskuje się użyteczne informacje dotyczące rozpatrywanego obiektu badań oraz formułuje się wnioski z przeprowadzonych badań. Najbardziej popularną miarą dopasowania otrzymanej funkcji obiektu badań do wyników pomiarów jest współczynnik determinacji R^2 oraz średni błąd aproksymacji $\sigma(y)$ (nazywany odchyleniem standardowym) [3, 6]. Do aproksymacji charakterystyk prędkościowych wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów, z wykorzystaniem wielomianów trzeciego stopnia, dla których współczynnik determinacji R^2 był największy. Charakterystyki prędkościowe rozpatrywanego obiektu badań, z przedstawioną zależnością funkcyjną, współczynnikiem determinacji R^2 oraz średnim błędem aproksymacji $\sigma(y)$, przedstawiają rysunki 3–7.



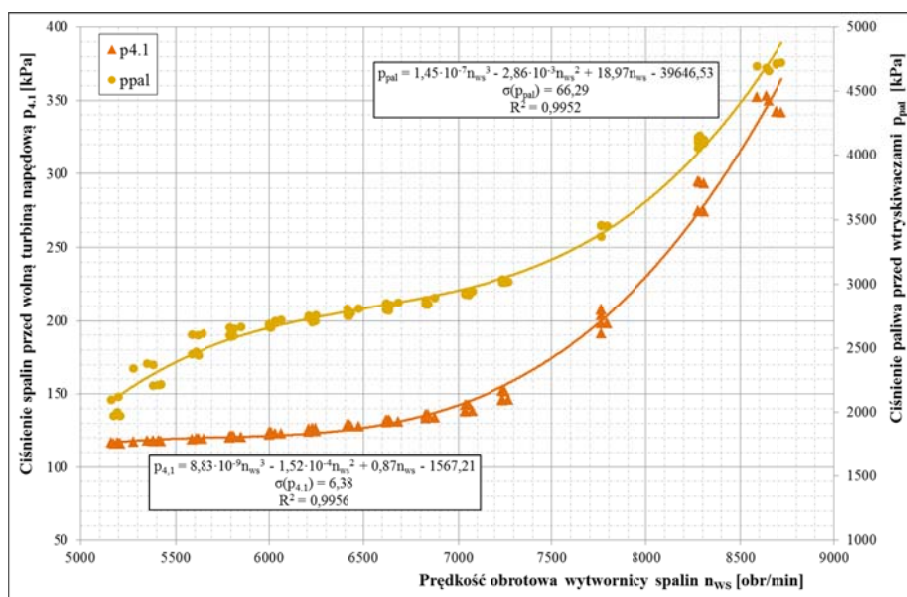
Rys. 3. Zależność wyników pomiaru temperatury powietrza przed sprężarką T_1 i temperatury spalin przed wolną turbiną napędową $T_{4.1}$ od prędkości obrotowej wytłocznic spalin n_{WS}

Źródło: opracowanie własne.



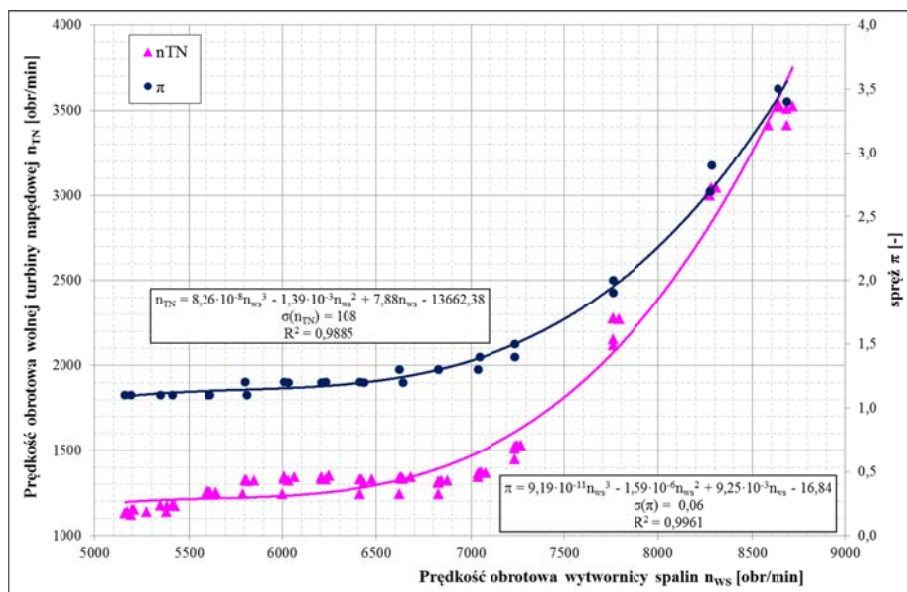
Rys. 4. Zależność wyników pomiaru ciśnienia powietrza przed sprężarką p_1 i za sprężarką p_2 od prędkości obrotowej wytownicy spalin n_{ws}

Źródło: opracowanie własne.



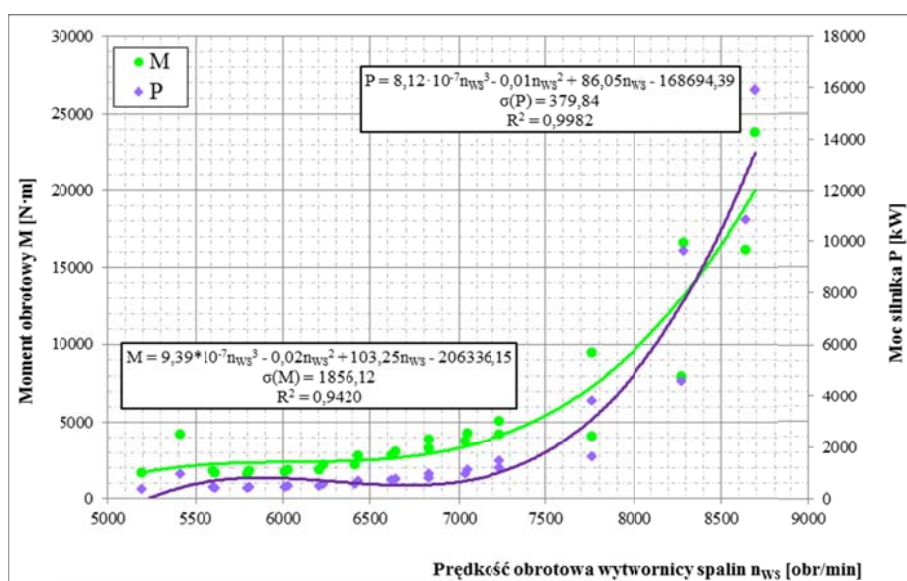
Rys. 5. Zależność wyników pomiaru ciśnienia spalin przed wolną turbiną napędową $p_{4.1}$ i ciśnienia paliwa przed wtryskiwaczami p_{pal} od prędkości obrotowej wytownicy spalin n_{ws}

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Zależność wyników pomiaru prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej n_{TN} i sprężu π od prędkości obrotowej wytwornicy spalin n_{WS}

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Zależność wyników pomiaru momentu obrotowego M i mocy silnika P od prędkości obrotowej wytwornicy spalin n_{WS}

Źródło: opracowanie własne.

Dokonując analizy otrzymanych zależności funkcyjnych charakterystyk prędkościowych rozpatrywanego obiektu badań i porównując je z informacjami zawartymi w dokumentacji okrętowej, można stwierdzić, że zarówno charakter przebiegu, jak i zakres zmienności wartości rozpatrywanych parametrów pracy są zgodne z dokumentacją okrętową. Z przebiegu charakterystyk wynika, że zależności parametrów względem obciążenia są nieliniowe. Jedynie charakterystyka temperatury powietrza przed sprężarką wykazuje zależność o naturze liniowej. Zauważalna jest również liniowość charakterystyk w zakresie od obciążenia minimalnego do obciążenia, w którym występuje osiągnięcie maksymalnego skoku śruby. Maksymalny skok śruby występuje przy prędkości obrotowej wytwornicy spalin równej około 7000 obr/min. Z charakterystyk wynika również, że zdecydowany wzrost mocy silnika występuje po osiągnięciu maksymalnego skoku śruby, przy współpracy wolnej turbiny napędowej ze śrubą przy jej maksymalnym, ustalonym skoku. W chwili osiągnięcia maksymalnego skoku śruby silnik osiąga moc około 1400 kW, przy maksymalnej jego mocy 18500 kW.

WNIOSKI

Wyznaczenie charakterystyk prędkościowych badanego silnika pozwala na ich wykorzystanie w szeroko pojętym procesie diagnozowania. Stwarza to możliwość świadomej eksploatacji silnika według jego stanu technicznego. Obserwacja trendów zmiany przebiegu wyznaczonych charakterystyk pozwoli na uzyskanie informacji mogących służyć przy podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych dotyczących obsługi, regulacji lub wymiany podzespołów silnika, jak również jego remontów.

Opracowane zależności funkcyjne charakterystyk prędkościowych badanego silnika pozwolą na analityczne wyznaczanie parametrów pracy silnika na podstawie wartości prędkości obrotowych wytwornicy spalin, reprezentującej jej stan energetyczny, dla dowolnych parametrów stanu otoczenia. Powyższe zależności pozwolą na wyznaczanie parametrów pracy silnika w sposób przybliżony, ale z wystarczającą w aplikacjach inżynierskich dokładnością, na potrzeby dalszych badań (modelowania) tego typu silników.

Wiedza i doświadczenie związane z charakterystykami badanego silnika są wykorzystywane również w procesie kształcenia i szkolenia osób odpowiedzialnych za eksploatację tego rodzaju silników, realizowanym na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Jest to szczególnie ważne, gdyż niewłaściwa eksploatacja prowadzi niejednokrotnie do poważnych uszkodzeń, mających wpływ na gotowość bojową okrętu, a co za tym idzie, generuje również duże i nieplanowane koszty w procesie eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Charchalis A., *Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych*, AMW, Gdynia 1991.
- [2] Dźygadło Z., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R., *Napędy lotnicze – zespoły wirnikowe silników turbinowych*, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [3] Pieriegudow W., *Metoda najmniejszych kwadratów i jej zastosowanie*, PWE, Warszawa 1967.
- [4] Pojawa B., *Stanowisko laboratoryjne dwuwirnikowego silnika turbiny*, XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO '05, Gdynia 2005.
- [5] Pojawa B., *Rola charakterystyk eksploatacyjnych w eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych*, „Logistyka”, 2010, nr 6.
- [6] Taylor J. R., *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [7] *Instrukcja obsługi układu napędowego fregaty FFG9*.

DESIGN THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF NAVAL GAS TURBINE LM 2500

ABSTRACT

The paper presents the results of preliminary studies on the development the operational characteristics an object of research work in the states agreed. The object of the research are the

main propulsion engines frigate type Oliver Hazard Perry which is supplied with the Polish Navy. Preliminary tests were carried out during the departure of the ship to sea in a ship's engine room. During the test engines have been simultaneous and the balanced load. In order to allow comparison of operational characteristics of engines tested, as well as references to the various weather conditions, the results of measurements on which it was set, brought to so regulated by weather conditions. For these characteristics, using statistical analysis, were determined dependence of approximation.

Keywords:

naval gas turbine, operational characteristics, power transmission system.