

Bogdan Pojawa
Akademia Marynarki Wojennej

CHARAKTERYSTYKI OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH W STANACH PRACY USTALONEJ

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z eksploatacją okrętowych układów napędowych z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi, w szczególności dotyczące charakterystyk okrętowych turbinowych silników spalinowych w stanach pracy ustalonej. Zaprezentowano zagadnienia dotyczące ich podstaw teoretycznych oraz metod i sposobów wyznaczania. Pokazano również przykłady charakterystyk wyznaczonych podczas badań na stanowisku laboratoryjnym dwuwirnikowego turbinowego silnika spalinowego.

Słowa kluczowe:

okrętowy turbinowy silnik spalinowy, okrętowy układ napędowy, charakterystyka.

WSTĘP

W procesie eksploatacji okrętowych układów napędowych niezbędna jest znajomość ich parametrów pracy, w zależności od obciążenia wynikającego z prędkości pływania okrętu. Zależności te przedstawiają charakterystyki eksploatacyjne. Z uwagi na to, że energię mechaniczną niezbędną do napędu okrętu zapewniają silniki główne, dlatego to ich charakterystyki są najbardziej istotne. Silniki główne za pośrednictwem mechanizmów pośredniczących w przekazywaniu momentu obrotowego (sprzęgła, przekładnie, linie wałów) współpracują z pędnikami (najczęściej stosowanymi pędnikami na okrętach są pędniki śrubowe). Charakterystyki pędników oraz powyższych mechanizmów wpływają jedynie na ogólną sprawność okrętowego układu napędowego, nie mają zaś wpływu na ilość doprowadzanej energii

mechanicznej, która zależy od rodzaju i mocy silnika głównego. Z tego też powodu tak bardzo ważne dla eksploatatora są charakterystyki silników napędu głównego.

Obecnie obserwuje się tendencję do strategii eksploatacji według stanu technicznego. Przyczynił się do tego ciągły rozwój techniki, który spowodował upowszechnienie automatyzacji oraz stworzył nowe rozwiązania sprzętowe, również w zakresie pomiarowym. Dzięki temu możliwy był rozwój nowych metod oraz narzędzi do szeroko pojętego diagnozowania eksploatowanego sprzętu technicznego [2]. Możliwa stała się okresowa oraz ciągła ocena stanu technicznego w procesie eksploatacji. Daleko rozwinięta diagnostyka stworzyła możliwości do przewidywania i zapobiegania usterkom technicznym, a także do obsługi i utrzymania sprzętu technicznego w ciągłej gotowości do eksploatacji. Obecnie strategia eksploatacji ukierunkowana jest na bezawaryjną, niezawodną oraz ekonomiczną eksploatację sprzętu technicznego.

Rzeczony rozwój techniki dotyczył również szeroko pojętej techniki morskiej w zakresie eksploatacji siłowni okrętowych, a w szczególności okrętowych układów napędowych. Dokonano modernizacji wielu istniejących, a także wyprodukowano szereg nowych konstrukcji silnikowych. Zapewnienie okrętom, ze względów operacyjnych, coraz większych prędkości pływania wymagało zapotrzebowania dużej mocy do ich napędu. Skutkiem tego było coraz częstsze wykorzystywanie w okrętowych układach napędowych okrętowych turbinowych silników spalinowych. Jednak przy zachowaniu dużej mocy jednostkowej tych silników i przy jednoczesnym zwiększonym jednostkowym zużyciu paliwa ze względów ekonomicznych wystąpił bardzo szybki rozwój okrętowych kombinowanych układów napędowych. W układach tych zastosowanie znalazły również okrętowe turbinowe silniki spalinowe, w szczególności w kombinowanych układach napędowych okrętów typu korweta oraz fregata [4].

CHARAKTERYSTYKI OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Charakterystykę okrętowego turbinowego silnika spalinowego 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. Charakterystyki okrętowych turbinowych silników spalinowych są wynikiem współpracy maszyn przepływowych będących głównymi elementami silnika turbinowego. Należą do nich: sprężarka, komora spalania oraz turbina. Ponadto w okrętowym

turbinowym silniku spalinowym występuje wolna turbina napędowa, która nie jest mechanicznie sprzężona z wytwornicą spalin, a jedynie termogazodynamicznie.

Stan energetyczny silnika (wytwornicy spalin) zależy jest 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 oddzielną 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 [5, 8]. Ponadto można wyróżnić inne dodatkowe parametry charakteryzujące pracę silnika. W przypadku okrętowych turbinowych silników spalinowych do parametrów tych należą:

- 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;
- sprzęż 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 szczególne: maksymalny, nominalny (obliczeniowy), mocy częściowych (eksploatacyjnych), mocy minimalnej;
- *n i e u s t a l o n e* (przejściowe), do których należą rozruch lub wyłączenie silnika z pracy oraz akceleracja i deceleracja.

W związku z powyższym można dokonać klasyfikacji charakterystyk okrętowych turbinowych silników spalinowych na:

- statyczne:
 - obrotowe,
 - obciążeniowe,
 - współpracy silnika z odbiornikiem energii;

- dynamiczne (przejściowe):
 - rozruchowe,
 - akceleracji i deceleracji;
- ogólne lub uniwersalne (wieloparametrowe).

W niniejszym artykule przedstawione zostaną charakterystyki statyczne okrętowych turbinowych silników spalinowych.

METODY WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK

Wyznaczania charakterystyk okrętowych turbinowych silników spalinowych dokonuje się na specjalnie przeznaczonych do tego celu stanowiskach hamownianych. Stanowiska takie umożliwiają zamontowanie badanego silnika oraz pracę w całym zakresie zmienności jego obciążeń. Odbiornikami energii na stanowiskach hamownianych są różnego typu hamulce obciążeniowe, dobrane odpowiednio pod względem mocy badanego silnika. W przypadku okrętowych turbinowych silników spalinowych, z uwagi na ich duże moce, są to hamulce hydrauliczne (wodne), elektrowirowe oraz elektromagnetyczne. Ponadto stanowiska hamowniane wyposażone są w stanowiskowe systemy pomiarowo-rejestrujące umożliwiające pomiar i rejestrację parametrów pracy silnika w pełnym zakresie zmienności jego obciążeń. Na ilość rejestrowanych parametrów pracy silnika wpływa jego „podatność pomiarowa”, tzn. liczba przetworników pomiarowych, w które wyposażony jest silnik przez producenta, jak również opcjonalne występowanie w korpusie silnika specjalnych króćców do podłączenia dodatkowych, odpowiednich przetworników pomiarowych. Na podstawie zarejestrowanych parametrów pracy wyznacza się charakterystyki badanego silnika, a następnie sprowadza się je (redukuje) do warunków normalnych fizycznych ($T_{ot} = 273 \text{ K}$, $p_{ot} = 101325 \text{ Pa}$) w celu zapewnienia możliwości ich wykorzystania w różnych warunkach otoczenia zależnych od jego parametrów stanu [3, 7]. Wspomniane powyżej stanowiska hamowniane występują najczęściej u producenta silnika lub w zakładach remontowych, umożliwiając dodatkowo wstępne dotarcie produkowanego lub remontowanego silnika. Specjalną odmianą stanowisk hamownianych są laboratoryjne stanowiska hamowniane przeznaczone głównie do prowadzenia szeroko pojętych badań naukowych. Występują one najczęściej w ośrodkach badawczo-rozwojowych oraz wyższych uczelniach technicznych, w których dodatkowo stanowią zaplecze laboratoryjne prowadzonych kierunków studiów. Przykładem takiego stanowiska może być stanowisko laboratoryjne turbinowego silnika spalinowego GTD-350 znajdujące się w Katedrze Siłowni Okrętowych Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej [6].

Sposób obciążania (hamowania) badanego silnika na stanowisku hamownianym zależy od rodzaju pędnika, z którym badany silnik współpracuje w warunkach okrętowych. Najczęściej są to śruby o skoku stałym lub nastawnym. W pierwszym przypadku obciążanie silnika odbywa się zgodnie z charakterystyką śrubową, natomiast w drugim będzie to rodzina charakterystyk śrubowych zależnych od nastawionego skoku śruby, nazywana również polem współpracy silnika z odbiornikiem energii.

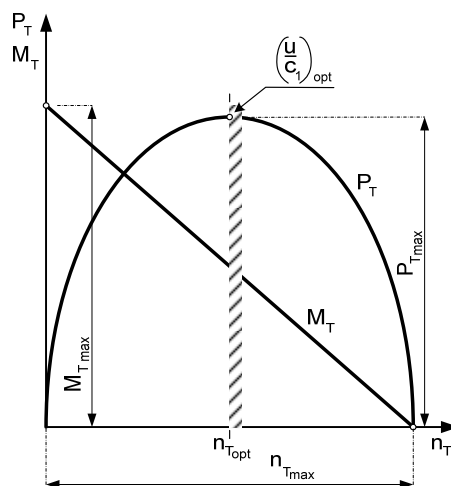
Charakterystyki okrętowych turbinowych silników spalinowych wyznaczone na stanowisku hamownianym mogą w różnym stopniu różnić się od tych, które występują w warunkach siłowniowych. Mają na to głównie wpływ kanały dolotu powietrza, kanały wylotu spalin oraz rodzaj paliwa. Dlatego też zalecane jest wyznaczanie charakterystyk silników w warunkach okrętowych. Podczas takich badań konieczne jest wyjście okrętu na morze i zapewnienie ustalonych warunków pracy, zgodnie z odpowiednim harmonogramem badań obejmującym wszystkie charakterystyczne obciążenia badanego układu napędowego. Przed przystąpieniem do badań należy dokonać kalibracji wszystkich torów pomiarowych rejestrowanych wielkości fizycznych, okrętowych oraz instalowanych dodatkowo. Bardzo ważnym zagadnieniem podczas badań w warunkach okrętowych jest pomiar i rejestracja użytecznego momentu obrotowego, który jednoznacznie określa obciążenie badanego układu napędowego, a także pomiar i rejestracja zużycia paliwa. Z uwagi na to, że nie wszystkie układy napędowe okrętów są wyposażone w układy pomiarowe służące do pomiaru momentu obrotowego i zużycia paliwa, w takich przypadkach należy umożliwić ich pomiar, wykorzystując dostępne metody i przyrządy pomiarowe.

Możliwość realizacji badań w celu wyznaczenia charakterystyk okrętowych turbinowych silników spalinowych w warunkach okrętowych stwarza możliwości do szeroko pojętego diagnozowania badanego układu napędowego oraz realizacji jego eksploatacji według stanu technicznego. Ponadto systematycznie wyznaczone charakterystyki mogą być wykorzystywane przy podejmowaniu decyzji dotyczących bieżących obsługa i regulacji, a następnie sprawdzania efektów wykonanych czynności.

CHARAKTERYSTYKI OBROTOWE

Charakterystyka obrotowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z oddzielną turbiną napędową jest charakterystyką złożoną, wyrażającą głównie zmianę mocy, momentu obrotowego i jednostkowego zużycia paliwa w zależności od prędkości obrotowych wirników — wyciornicy spalin i turbiny napędowej, przy określonym sposobie regulacji silnika. Pod pojęciem sposobu regulacji rozumie się przyjętą zmienność temperatury spalin przed turbiną wyciornicy spalin, w zależności od jej

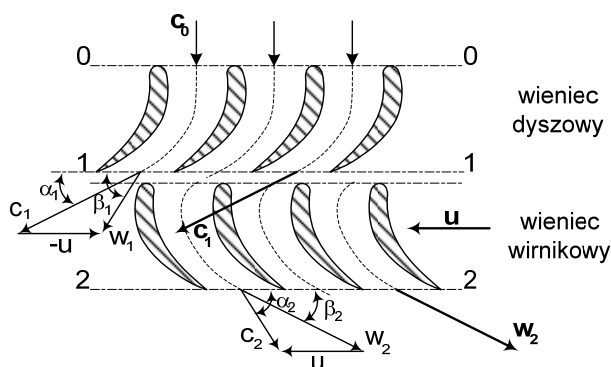
prędkości obrotowej [9]. Moc wolnej turbiny napędowej w funkcji jej prędkości obrotowej, przy stałej prędkości obrotowej wytwornicy spalin, ma stosunkowo płaski przebieg, co pozwala na wybór optymalnego zakresu pracy silnika bez straty jego mocy [3, 9]. Zależność momentu obrotowego i mocy turbiny w stosunku do zmiany jej prędkości obrotowej przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Zależność mocy oraz momentu obrotowego jednostopniowej turbiny spalinowej od jej prędkości obrotowej

Źródło: opracowanie własne.

Aby lepiej zrozumieć istotę działania turbiny spalinowej jako maszyny przepływowej, w tym również charakter zmiany jej mocy od prędkości obrotowej, należy odnieść się do zasady działania stopnia turbiny. Każda turbina spalinowa składa się z dwóch podstawowych podzespołów: wieńca nieruchomego profilowanych łopatek, zwanego wieńcem dyszowym (kierownicowym), oraz z wieńca ruchomego profilowanych łopatek, zwanego wieńcem wirnikowym. Wieniec dyszowy i wirnikowy stanowią stopień turbiny. Gdy turbina ma tylko jeden stopień, nazywana jest jednostopniową, a w przypadku występowania kilku stopni nazywana jest wielostopniową. Ze względu na duże natężenia przepływu oraz duże wielkości rozporządzalnej energii strumienia czynnika roboczego (spalin) na wlocie do turbiny, w okrętowych turbinowych silnikach spalinowych zastosowanie znalazły turbiny osiowe, reakcyjne [3]. Są to turbiny, w których wektor prędkości strumienia spalin jest w przybliżeniu równoległy do osi wirnika turbiny (osiowy), a rozprężanie spalin realizowane jest zarówno w wieńcach dyszowych, jak i wirnikowych [9]. Schemat stopnia osiowej turbiny reakcyjnej przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat kinematyki przepływu strumienia spalin w stopniu osiowej turbiny reakcyjnej:
 c — prędkość bezwzględna; w — prędkość względna; u — prędkość obwodowa;
 0–0 — przekrój wlotowy wieńca dyszowego; 1–1 — przekrój wylotowy wieńca dyszowego
 będący jednocześnie przekrojem wlotowym wieńca wirnikowego; 2–2 — przekrój wylotowy
 wieńca wirnikowego; α, β — kąty określające geometrię palisady łopatek wieńca

Źródło: opracowanie własne.

Moc turbiny przekazywaną za pośrednictwem wału do odbiornika energii (w przypadku turbiny wytwornicy spalin jest to sprężarka silnika, a w przypadku wolnej turbiny napędowej — śruba napędowa) można określić zależnością:

$$P_T = \dot{m} \cdot l_T = \dot{m} \cdot \Delta i_{Tiz} \cdot \eta_{eT}, \quad (1)$$

gdzie:

- \dot{m} — natężenie przepływu czynnika roboczego (spalin);
- l_T — praca efektywna stopnia turbiny;
- Δi_{Tiz} — dysponowany spadek entalpii spalin stopnia turbiny;
- η_{eT} — sprawność efektywna stopnia turbiny.

Przy ustalonych parametrach stanu czynnika roboczego na wlocie do turbiny (przekrój 0–0 na rysunku 2.), zmianę mocy stopnia turbiny determinuje jej sprawność efektywna [3]:

$$\eta_{eT} = 2 \cdot \varphi^2 \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \left(\frac{u}{c_1} \right) \cdot \left(1 - \frac{u}{c_1 \cos \alpha_1} \right) \cdot \left(1 + \psi \cdot \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \right), \quad (2)$$

gdzie:

- φ — współczynnik strat prędkości bezwzględnej;
- ψ — współczynnik strat prędkości względnej.

Decydujący wpływ na sprawność efektywną stopnia turbiny mają straty występujące podczas przepływu czynnika roboczego. Sprawność osiąga swoją największą wartość dla odpowiedniego (optymalnego) stosunku prędkości obwodowej czynnika (u) do jego prędkości bezwzględnej (c_1), tzw. (u/c_1). Analizując równanie (2), można stwierdzić, że odchylenie wartości (u/c_1) od wartości optymalnej powoduje spadek sprawności obwodowej według zależności typu parabolicznego. Z tego względu charakterystyka mocy stopnia turbiny spalinowej w funkcji jej prędkości obrotowej, dla ustalonych parametrów stanu czynnika roboczego, teoretycznie jest parabolą drugiego stopnia, a moment obrotowy jest zależny liniowo. Moment obrotowy teoretycznie osiąga swoją maksymalną wartość w przypadku zastopowania turbiny. Prędkość obwodowa wirnika turbiny spalinowej ograniczona jest warunkami wytrzymałościowymi, dlatego też w normalnej eksploatacji uwzględnia się jedynie zmiany prędkości obrotowej turbiny w zakresie od małych prędkości do prędkości optymalnej, przy której turbina uzyskuje moc maksymalną.

Z uwagi na powyższe oraz specyfikę okrętowych turbinowych silników spalinowych z oddzielną turbiną napędową, którą jest możliwość niezależnej zmiany prędkości obrotowej wirnika turbiny napędowej (połączonej za pomocą linii wałów z odbiornikiem energii) i wirnika wytwornicy spalin, w dosyć szerokim zakresie prędkości obrotowej wału napędowego, charakterystyki obrotowe okrętowych turbinowych silników spalinowych rozpatruje się zwykle dla dwóch przypadków.

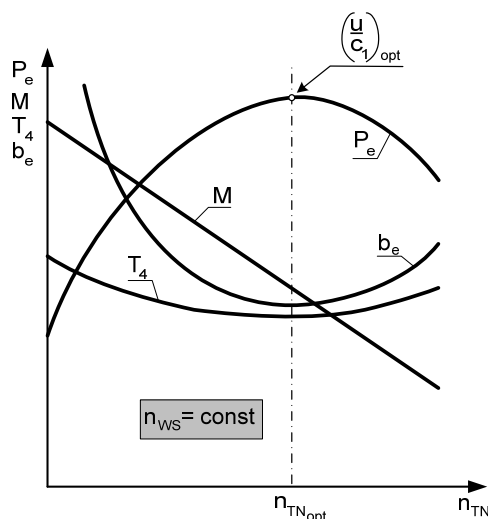
W pierwszym jest to charakterystyka obrotowa wyrażająca zależność mocy użytecznej P_e i użytecznego momentu obrotowego M turbiny napędowej, jednostkowego zużycia paliwa b_e oraz temperatury spalin T_4 od prędkości obrotowej wirnika turbiny napędowej n_{TN} , przy stałej prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin n_{ws} . Przykład takiej charakterystyki przedstawia rysunek 3.

Dla mniejszych prędkości obrotowych turbiny napędowej niż prędkość optymalna następuje spadek mocy turbiny przy jednoczesnym wzroście momentu obrotowego, temperatury spalin za turbiną oraz jednostkowego zużycia paliwa. Należy mieć na uwadze, że maksymalnej prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin odpowiadają maksymalne wartości mocy użytecznej, użytecznego momentu obrotowego, godzinowego zużycia paliwa, temperatury spalin za turbiną oraz minimalna wartość jednostkowego zużycia paliwa. Zatem charakterystyka obrotowa odpowiadająca tym warunkom, zgodnie z analogią do silnika tłokowego, nazywana jest charakterystyką zewnętrzną mocy maksymalnej.

Przez analogię powstają charakterystyki zewnętrzne mocy nominalnej oraz mocy eksploatacyjnych. Powstaje wówczas charakterystyka obrotowa zewnętrzna, przedstawiająca zależność mocy użytecznej, użytecznego momentu obrotowego,

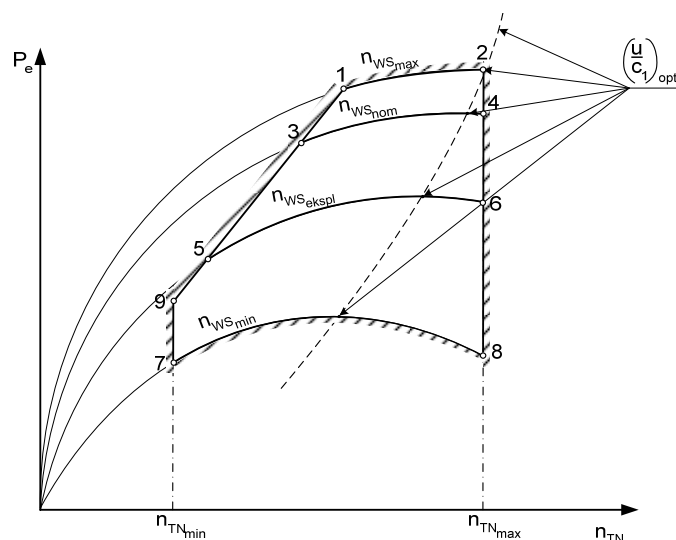
godzinowego zużycia paliwa, temperatury spalin za turbiną oraz jednostkowego zużycia paliwa od prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej, dla różnych stanów energetycznych silnika (wytwornicy spalin) reprezentowanych przez stałe prędkości obrotowe wytwornicy spalin. Charakterystykę obrotową zewnętrzną pokazano na rysunku 4. Przedstawia ona kilka zewnętrznych charakterystyk mocy częściowych 1–2; 3–4, 5–6 oraz 7–8, a także ograniczenia możliwych osiągnięć okrętowego turbinowego silnika spalinowego. Pole osiągnięć silnika (możliwych stanów pracy) stanowi obszar zawarty między liniami 1–2–8–7–9–1, z tym że obszar 1–2–4–3–1 jest obszarem pracy krótkotrwałej. Ilość czasu pracy silnika w obszarze pracy krótkotrwałej jest określana przez jego producenta na cały okres eksploatacji silnika.

Na charakterystyce tej możliwe jest również przedstawienie, odpowiadających poszczególnym charakterystykom mocy, przebiegów momentu obrotowego, temperatury spalin wylotowych oraz jednostkowego zużycia paliwa. Nie przedstawiono jednak powyższych wielkości, by zapewnić czytelność i zrozumienie istoty charakterystyki. Taka pełniejsza charakterystyka obrotowa zewnętrzna uświadamia ewentualne skutki przy wyższych stanach energetycznych silnika (wytwornicy spalin) oraz przy dużych obciążeniach wolnej turbiny napędowej pochodzących od odbiornika energii, gdy występują wysokie temperatury spalin.



Rys. 3. Charakterystyka obrotowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową

Źródło: opracowanie własne.

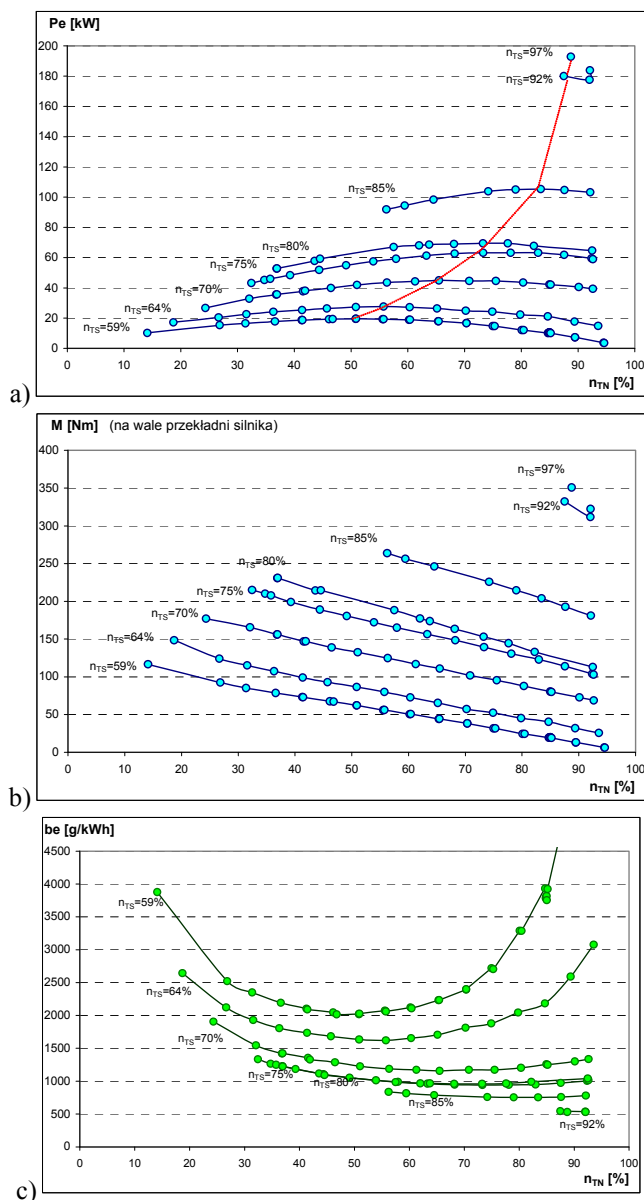


Rys. 4. Charakterystyka obrotowa zewnętrzna okretowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową: 1-2 — charakterystyka zewnętrzna mocy maksymalnej; 3-4 — charakterystyka zewnętrzna mocy nominalnej; 5-6 — charakterystyka zewnętrzna tzw. mocy częściowej (eksploatacyjnej); 7-8 — charakterystyka zewnętrzna mocy minimalnej; 1-9 — linia ograniczająca stabilną pracę sprężarki (tzw. linia pompażu); 2-8 — linia ograniczająca wielkość obrotów maksymalnych; 7-9 — linia ograniczająca wielkość obrotów minimalnych

Źródło: opracowanie własne.

W turbinowych silnikach spalinowych, przy dużych obciążeniach, a małych prędkościach obrotowych wolnej turbiny napędowej, występuje tzw. zjawisko pompażu. Objawia się ono w postaci niestabilnej pracy sprężarki. Przyczyną jest wzrost ciśnienia w kanale przepływowym silnika za sprężarką. Najogólniej można opisać to w ten sposób, że wskutek dużego obciążenia wolnej turbiny napędowej pochodzącego od odbiornika energii, jej prędkość obrotowa na tyle się obniża, iż cały strumień spalin nie może przez nią przepłynąć i występuje zjawisko dławienia. Początkowo dławienie powoduje akumulację energii w przestrzeniach kanału przepływowego pomiędzy turbinami wytwornicy spalin i wolnej turbiny napędowej oraz w komorze spalania, a w chwili gdy wartość ciśnienia spalin przekroczy wartość ciśnienia powietrza za sprężarką, część spalin uchodzi pulsacyjnie poprzez sprężarkę w odwrotnym kierunku. Zjawisko to jest przyczyną powstawania uszkodzeń sprężarki, a nawet całego silnika. Przyczyną pompażu mogą być również zakłócenia w pracy samej sprężarki, spowodowane na przykład zanieczyszczeniem jej części przepływowej. Granicą niestabilnej pracy sprężarki na charakterystyce obrotowej zewnętrznej jest linia 1-9, nazywana „linią pompażu” [9].

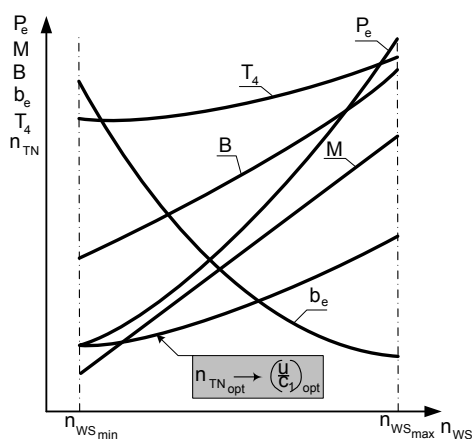
Przykładową charakterystykę obrotową zewnętrzną turbinowego silnika spalinowego GTD-350 przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Charakterystyka obrotowa zewnętrzna turbinowego silnika spalinowego GTD-350 — zależność zmian mocy użytecznej P_e (a), momentu obrotowego M (b) oraz jednostkowego zużycia paliwa b_e (c) od prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej przy różnych prędkościach obrotowych wirnika wytwornicy spalin (różnych wartościach mocy silnika)

Źródło W. Balicki, W. Gryglewski, B. Niedziałek, *Możliwości wykorzystania silnika GTD-350 w zastosowaniach nielotniczych*, VI Symposium Naukowo-Techniczne „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, Jurata 2003.

W drugim przypadku charakterystykę obrotową można przedstawić w postaci zależności optymalnych wartości mocy użytecznej P_e i użytecznego momentu obrotowego M turbiny napędowej, a także odpowiadającym im jednostkowemu zużyciu paliwa b_e i temperatury spalin wylotowych T_4 od prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin, przy zachowaniu prędkości obrotowych wolnej turbiny napędowej, w których występują jej optymalne warunki pracy $[(u/c_1)_{opt}]$. Charakterystykę obrotową okrętowego turbinowego silnika spalinowego wyznaczoną dla optymalnych warunków pracy wolnej turbiny napędowej przedstawia rysunek 6. Na charakterystyce tej możliwe jest również przedstawienie zależności parametrów stanu czynnika roboczego w swoistych przekrojach odpowiadających węzłowym punktom realizacji obiegu termodynamicznego silnika.

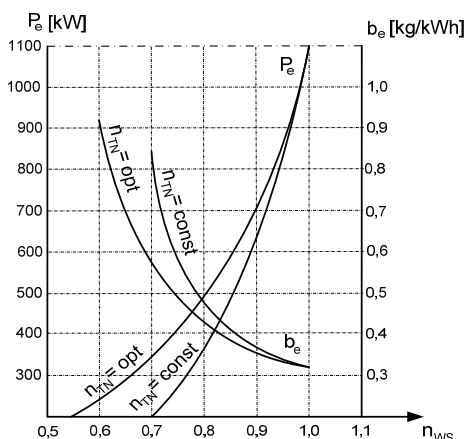


Rys. 6. Charakterystyka obrotowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową

Źródło: opracowanie własne.

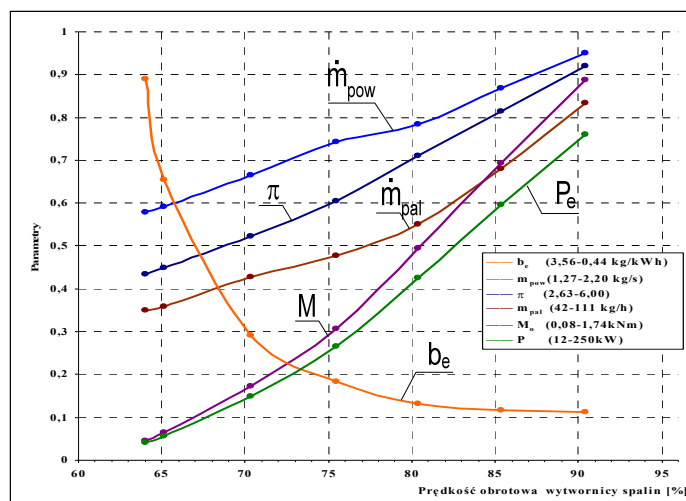
Zdarza się, że rozpatrywana charakterystyka wyznaczana jest przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej odpowiadającej optymalnym warunkom pracy (warunkom projektowym) na charakterystyce zewnętrznej maksymalnej lub nominalnej. Należy mieć wówczas świadomość, że wyznaczone w takich warunkach charakterystyki będą znacznie odbiegały od tych, jakie występują przy zachowaniu optymalnych prędkości obrotowych wolnej turbiny napędowej. W szczególności dotyczy to obciążeń zbliżonych do mocy minimalnych.

Przykładowe porównanie charakterystyk obrotowych okrętowego turbinowego silnika spalinowego wyznaczonych dla optymalnych warunków pracy i przy stałej prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej odpowiadającej optymalnym warunkom pracy na charakterystyce obrotowej zewnętrznej mocy maksymalnej przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Przykładowe porównanie charakterystyk obrotowych okrętowego turbinowego silnika spalinowego wyznaczonych dla optymalnych warunków pracy i przy stałej prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej odpowiadającej charakterystyce obrotowej zewnętrznej mocy maksymalnej
 Źródło: opracowanie własne.

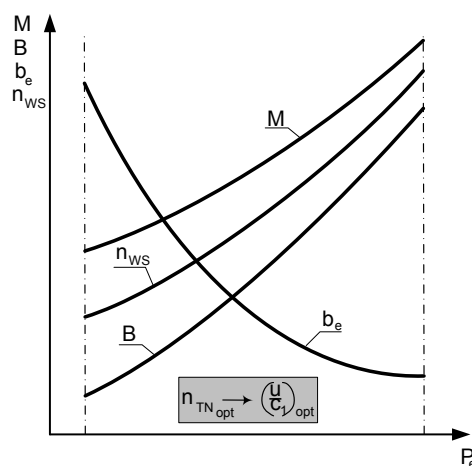
Przykładową charakterystykę obrotową turbinowego silnika spalinowego GTD-350 pokazuje rysunek 8. Przedstawia ona zależność wybranych wielkości fizycznych od prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin przy zachowaniu optymalnych warunków pracy wolnej turbiny napędowej.



Rys. 8. Charakterystyka obrotowa turbinowego silnika spalinowego GTD-350 — zależność zmian mocy użytecznej P_e , momentu obrotowego M , jednostkowego zużycia paliwa b_e , sprężu sprężarki π oraz strumieni paliwa \dot{m}_{pal} i powietrza \dot{m}_{pow} od prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin przy zachowaniu optymalnych warunków pracy wolnej turbiny napędowej
 Źródło: opracowanie własne.

CHARAKTERYSTYKI OBCIĄŻENIOWE

Charakterystyki obciążeniowe przedstawiają zależność parametrów określających stan energetyczny silnika (wytwornicy spalin) w funkcji jego mocy użytecznej. Charakterystyka obciążeniowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego przedstawia głównie zależności: jednostkowego zużycia paliwa b_e , godzinowego zużycia paliwa B_h , użytecznego momentu obrotowego M i prędkości obrotowej wytwornicy spalin n_{ws} od mocy użytecznej silnika P_e , przy zachowaniu prędkości obrotowych wolnej turbiny napędowej, dla których występują jej optymalne warunki pracy $[(u/c_1)_{opt}]$. Charakterystykę obciążeniową okrętowego turbinowego silnika spalinowego przedstawia rysunek 9.

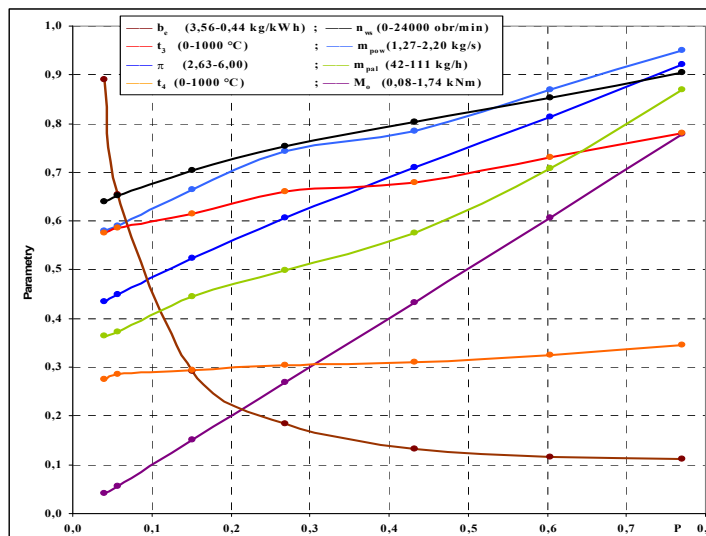


Rys. 9. Charakterystyka obciążeniowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową

Źródło: opracowanie własne.

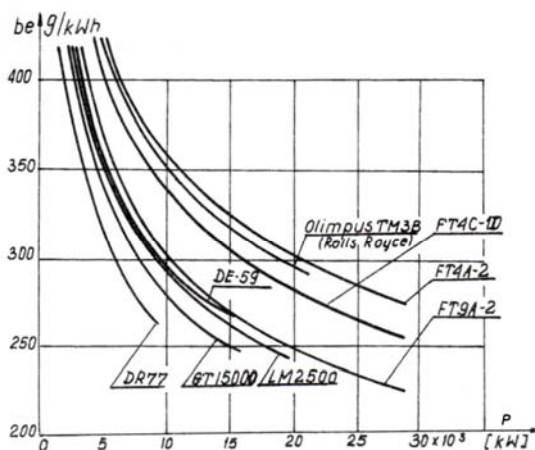
Przykładową charakterystykę obciążeniową turbinowego silnika spalinowego GTD-350 pokazuje rysunek 10. Przedstawia ona zależność wybranych wielkości fizycznych od mocy użytecznej silnika.

Dysponując charakterystyką obciążeniową, możliwy jest dobór najkorzystniejszego zakresu pracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego współpracującego z danym odbiornikiem energii, jak również porównywanie osiągnięć różnych silników. Przykładowe porównanie charakterystyk obciążeniowych różnych okrętowych turbinowych silników spalinowych przedstawia rysunek 11.



Rys. 10. Charakterystyka obciążeniowa turbinowego silnika spalinowego GTD-350 — zależność wybranych wielkości fizycznych od mocy użytecznej silnika przy zachowaniu optymalnych warunków pracy wolnej turbiny napędowej

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Przykładowe porównanie charakterystyk obciążeniowych różnych okrętowych turbinowych silników spalinowych

Źródło: W. Wojnowski, *Okrętowe silownie spalinowe, cz. I*, AMW, Gdynia 1998.

Z zależności przedstawionych na powyższym rysunku wynika ogromny wzrost zużycia paliwa przy występowaniu częściowych obciążeń okrętowego turbinowego

silnika spalinowego. Nieporównywalnie większy niż w przypadku okrętowych tłokowych silników spalinowych. Dlatego w siłowniach okrętowych z silnikami turbinowymi stosuje się silniki mocy marszowych i mocy szczytowych. Silniki mocy marszowych projektowane są pod względem osiągania największych sprawności, a silniki mocy szczytowych — największych mocy. Przy obciążeniach częściowych silniki mocy szczytowych mogą być wyłączone, tak aby silniki mocy marszowych mogły pracować możliwie przy pełnym obciążeniu, tzn. najsprawniej i najbardziej ekonomicznie. Ciekawy jest również fakt, że wszystkie typy silników mają zbliżone zużycie paliwa na obciążeniach minimalnych, a widoczne różnice w zużyciu paliwa występują jedynie przy ich obciążeniach nominalnych.

CHARAKTERYSTYKI WSPÓŁPRACY OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO Z ODBIORKIEM ENERGII

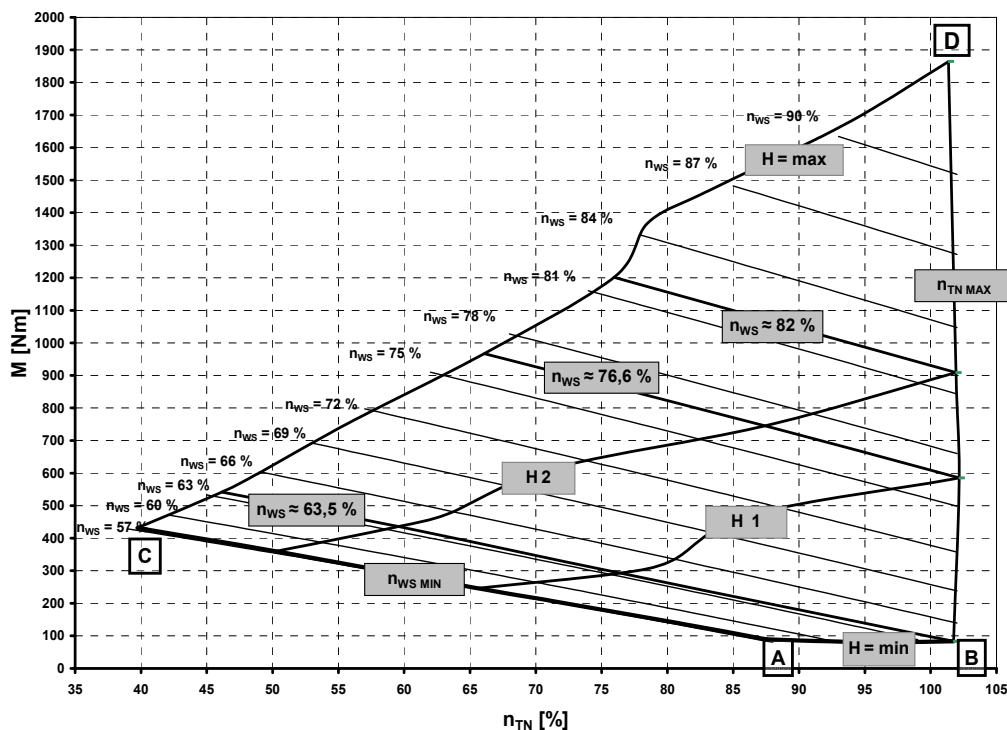
Charakterystyka współpracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego z odbiornikiem energii przedstawia sobą pole możliwych osiągnięć silnika w zależności od momentu oporowego pochodzącego od odbiornika energii. Pole możliwych osiągnięć ograniczone jest minimalnymi oraz maksymalnymi parametrami pracy silnika oraz minimalną i maksymalną nastawą odbiornika energii. Charakterystykę wykorzystuje się najczęściej do określania użytecznego momentu obrotowego w zależności od:

- parametru charakteryzującego stan energetyczny silnika (wytwornicy spalin) — n_{ws} , T_3 , p_2 ; najczęściej jest to prędkość obrotowa wytwornicy spalin n_{ws} ;
- parametru charakteryzującego współpracę wolnej turbiny napędowej z odbiornikiem energii, przy określonej jego nastawie; najczęściej jest to prędkość obrotowa wolnej turbiny napędowej n_{TN} .

Rozpatrywana charakterystyka jest zatem zbiorem charakterystyk obrotowych dla obciążeń częściowych silnika w funkcji prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej, przy stałej prędkości obrotowej wytwornicy spalin, w zakresie od mocy minimalnej do mocy maksymalnej silnika. Charakterystyka tego typu możliwa jest do wyznaczenia jedynie na stanowisku hamownianym, na którym odbiornikiem energii jest hamulec obciążeniowy umożliwiający zmianę charakterystyki momentu oporowego niezależnie od prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej silnika.

Przykładową charakterystykę współpracy turbinowego silnika spalinowego GTD-350 z hamulcem wodnym Froude'a przedstawia rysunek 12. Charakterystyka przedstawia zależność momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wolnej

turbiny napędowej dla różnych wartości prędkości obrotowych wytwornicy spalin oraz nastaw hamulca. Na powyższej charakterystyce możliwe jest również przedstawienie przebiegów mocy użytecznej, temperatury spalin wylotowych oraz jednostkowego zużycia paliwa. Aby jednak zapewnić czytelność i zrozumienie istoty charakterystyki nie przedstawiono tych wielkości.



Rys. 12. Charakterystyka współpracy turbinowego silnika spalinowego GTD-350 z hamulcem wodnym Froude'a; zależność momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej dla różnych wartości prędkości obrotowych wytwornicy spalin oraz nastaw hamulca

Źródło: opracowanie własne.

Powyższa charakterystyka ograniczona jest następującymi liniami: minimalnej mocy silnika AC, minimalnej AB i maksymalnej CD nastawy hamulca oraz maksymalnej prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej BD. Wewnątrz charakterystyki można wyróżnić linie stałych, wybranych prędkości obrotowych wytwornicy spalin n_{ws} oraz linie wybranych nastaw hamulca oznaczonych przez H.

W układach napędowych okrętów z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi odbiornikiem energii są najczęściej śruby okrętowe o skoku stałym lub nastawnym. Silnik napędzający śrubę okrętową o skoku stałym nie pracuje w całym

obszarze jego możliwych stanów pracy, lecz tylko w zakresie parametrów, jakie określa zapotrzebowanie momentu i mocy przez śrubę okrętową w miarę zmiany jej prędkości obrotowej. W zagadnieniach eksploatacji siłowni przyjmuje się, że silnik pracuje według charakterystyki śrubowej. Należy przez to rozumieć, że jest to charakterystyka obrotowa obciążenia silnika przez śrubę okrętową. Charakterystyka śrubowa zależna jest od charakterystyki oporowej kadłuba okrętu. Natomiast opór okrętu dla ruchu z ustaloną prędkością pływania zależy od następujących czynników [5]:

- prędkości pływania okrętu;
- wymiarów głównych i kształtu kadłuba;
- zanurzenia okrętu;
- stanu powierzchni kadłuba;
- głębokości i szerokości akwenu;
- warunków pogodowych (stanu morza, siły i kierunku wiatru).

W przypadku śrub o skoku nastawnym istnieje możliwość doboru optymalnych warunków współpracy wolnej turbiny napędowej ze śrubą $[(u/c_1)_{opt}]$ w wyniku zmiany skoku śruby. Inaczej jest w przypadku współpracy wolnej turbiny napędowej ze śrubą o skoku stałym, gdyż nie ma możliwości doboru optymalnego stosunku $[(u/c_1)_{opt}]$. Wówczas współpraca, podobnie zresztą jak w przypadku śruby o skoku nastawnym, zależy głównie od stanu morza, porośnięcia kadłuba, siły wiatru itp.

Polepszenie współpracy wolnej turbiny napędowej ze śrubą o skoku stałym wymagałoby zastosowania przekładni redukcyjnej umożliwiającej zmianę przełożenia, co przy mocach i momentach okrętowych turbinowych silników spalinowych jest trudne do zrealizowania. Zatem turbinowe silniki spalinowe współpracujące ze śrubą o skoku stałym pracują zazwyczaj w warunkach znacznie odbiegających od warunków optymalnych. Dlatego też celowe jest stosowanie w okrętowych układach napędowych z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi śrub o skoku nastawnym w celu umożliwienia zachowania optymalnych warunków pracy dla wolnej turbiny napędowej, a tym samym wykorzystania jej optymalnej mocy dla różnych zakresów pracy silnika. Przykładem takiego sposobu sterowania obciążeniem jest układ napędowy fregaty typu Oliver Hazard Perry.

PODSUMOWANIE

Eksploatacja okrętowych układów napędowych z okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi charakteryzuje się odmienną specyfiką eksploatacji niż z klasycznymi 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, jak sama nazwa wskazuje, 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. Pozwala ono na niezależną pracę zarówno wytwornicy spalin, jak i wolnej turbiny napędowej. 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) może doprowadzić do niepożądanych zjawisk, włącznie z uszkodzeniem silnika. Podsumowując, można stwierdzić, że powyższe sprzężenie termodynamiczne w największym stopniu wpływa na odmienną specyfikę eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych. Z odmienną specyfiką eksploatacji tego rodzaju silników związane są również ich charakterystyki.

Możliwość wyznaczania charakterystyk eksploatacyjnych pozwala na ich wykorzystanie w szeroko pojętym procesie diagnozowania. Dzięki temu istnieje możliwość świadomej eksploatacji według stanu technicznego. Obserwacja trendów zmiany przebiegu charakterystyk eksploatacyjnych oraz wybranych symptomów diagnostycznych pozwala na uzyskanie informacji mogących służyć do podejmowania decyzji eksploatacyjnych dotyczących gotowości bojowej okrętów, obsługi, regulacji lub wymiany podzespołów silnika, jak również remontów. Informacje te mogą być również wykorzystywane podczas modernizacji lub w nowych konstrukcjach silnikowych.

Wiedza i doświadczenie związane z charakterystykami eksploatacyjnymi są wykorzystywane również w kształceniu i szkoleniu kolejnych zastępów osób odpowiedzialnych za eksploatację tego rodzaju silników na różnych szczeblach. Jest to szczególnie ważne, gdyż niewłaściwa eksploatacja prowadzi niejednokrotnie do poważnych uszkodzeń, a co za tym idzie — generuje duże i nieplanowane koszty.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Gryglewski W., Niedziałek B., *Możliwości wykorzystania silnika GTD-350 w zastosowaniach nielotniczych*, VI Symposium Naukowo-Techniczne „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, Jurata 2003.

- [2] Charchalis A., Korczewski Z., *Badania diagnostyczne okrętowych turbinowych silników na podstawie analizy zmian parametrów termogazodynamicznych*, XIV Międzynarodowe Sympozjum Siłowni Okrętowych, Szczecin 1992.
- [3] Dźygadło Z., Łyżwiński M., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R., *Napędy lotnicze — zespoły wirnikowe silników turbinowych*, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [4] *Jane's Fighting Ships' 2004–2005*, S. Saunders RN, Jane's Information Group, Brighton 2004.
- [5] Nowak M., *Siłownie okrętowe dla mechaników — okrętowy układ napędowy*, AMW, Gdynia 1983.
- [6] Pojawa B., *Stanowisko laboratoryjne dwuwirnikowego silnika turbinowego*, XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO, Gdynia 2005.
- [7] Pudlik W., *Termodynamika*, PG, Gdańsk 1998.
- [8] Wojnowski W., *Okrętowe siłownie spalinowe, cz. I*, AMW, Gdynia 1998.
- [9] Речистер В. Д., *Справочник инженера–механика судовых газотурбинных установок*, Судостроение, Ленинград 1985.

THE CHARACTERISTICS OF MARINE GAS TURBINES IN STATIONARY MODE

ABSTRACT

The paper presents problems related to running a marine propulsion systems based on gas turbine engines. In particular, it deals with the characteristics of marine turbine engines in stationary mode. It includes issues related to the theoretical fundamentals, methods and procedures used to determine them. It also shows examples of characteristics determined on a laboratory-based gas turbine engine.

Keywords:

marine turbine internal-combustion engine, marine propulsion system, characteristic.