

Bogdan POJAWA<sup>1</sup>

### **ROLA CHARAKTERYSTYK EKSPLOATACYJNYCH W EKSPLOATACJI OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH**

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

### **APPLICATIONS OF OPERATING CHARACTERISTIC IN OPERATION OF NAVAL GAS TURBINE ENGINES**

*The problem naval power unit with the naval gas turbine engines operation is presented in the essay. In particular, the problem connected with operating characteristic of naval gas turbine engines in stationary state is described. There is presented theoretical base, method and ways theirs determine. What is more, there is presented examples of operating characteristic determined on the laboratory station with the gas turbine engine.*

#### **1. WSTĘP**

Eksplatacja 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

---

<sup>1</sup>Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, POLSKA,  
81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69, tel. + 48 58 626-27-57, e-mail: pojawabogdan@o2.pl

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, mogących doprowadzić do uszkodzenia silnika. Podsumowując można stwierdzić, że powyższe sprzężenie termodynamiczne w największym stopniu wpływa na odmienną specyfikę eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych.

W procesie eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych niezbędna jest znajomość ich parametrów pracy w zależności od ich obciążenia, wynikającego z prędkości pływania okrętu. Powyższe zależności przedstawiają charakterystyki eksploatacyjne.

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. Charakterystyki okrętowych turbinowych silników spalinowych są wynikiem współpracy maszyn przepływowych będących głównymi elementami silnika turbinowego. Należą do nich: sprężarka, komora spalania oraz turbina. Ponadto, jak już wspomniano, w okrętowym turbinowym silniku spalinowym występuje wolna turbina napędowa, która nie jest mechanicznie sprzężona z wytwornicą spalin, a jedynie termogazodynamicznie.

## 2. KLASYFIKACJA CHARAKTERYSTYK

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 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 [4, 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);
- strumień masy powietrza, paliwa i spalin;
- spręż sprężarki.

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

- **ustalone**, w zakresie od mocy minimalnej (potocznie nazywanej „biegiem jałowym”) do mocy maksymalnej, a w tym jako szczególne: maksymalny, nominalny (obliczeniowy), mocy częściowych (eksploatacyjnych), mocy minimalnej;
- **nieustalone** (przejściowe), do których należą: rozruch lub wyłączenie silnika z pracy oraz akceleracja i deceleracja.

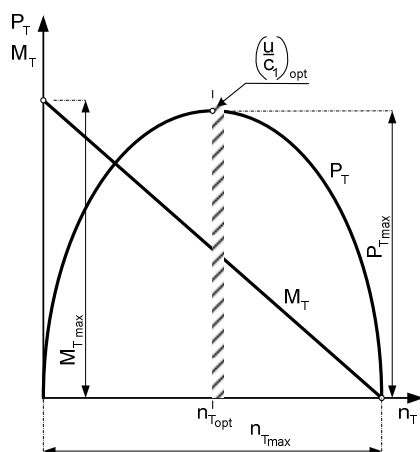
W związku z powyższym można dokonać klasyfikacji charakterystyk eksploatacyjnych okrętowych turbinowych silników spalinowych na:

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

Z uwagi na wymaganą liczbę stron, w niniejszym artykule przedstawione zostaną tylko charakterystyki statyczne.

### 3. 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

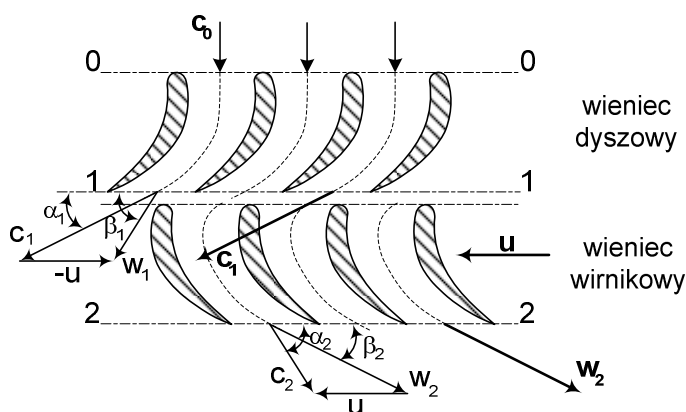


Rys. 1. Zależność mocy oraz momentu obrotowego jednostopniowej turbiny spalinowej od jej prędkości obrotowej

obrotowych wirników – wytwornicy spalin i turbiny napędowej, przy określonym sposobie regulacji silnika. Pod pojęciem sposobu regulacji rozumie się przyjętą zmienność temperatury spalin przed turbiną wytwornicy spalin, w zależności od jej prędkości obrotowej [6]. Moc 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, 6]. Zależność momentu obrotowego i mocy turbiny w zależności od zmiany jej prędkości obrotowej przedstawia rysunek 1. 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 oraz kinematyki przepływu strumienia spalin w stopniu 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. Wieńiec dyszowy oraz wirnikowy stanowią stopień turbiny. 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 [6]. 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;  $\alpha$ ,  $\beta$  – kąty określające geometrię palisady łopatek wieńca.

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,  
 $\Delta i_{Tiz}$  – dysponowany spadek entalpii spalin stopnia turbiny,  
 $\eta_{eT}$  – sprawność efektywna stopnia turbiny.

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

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

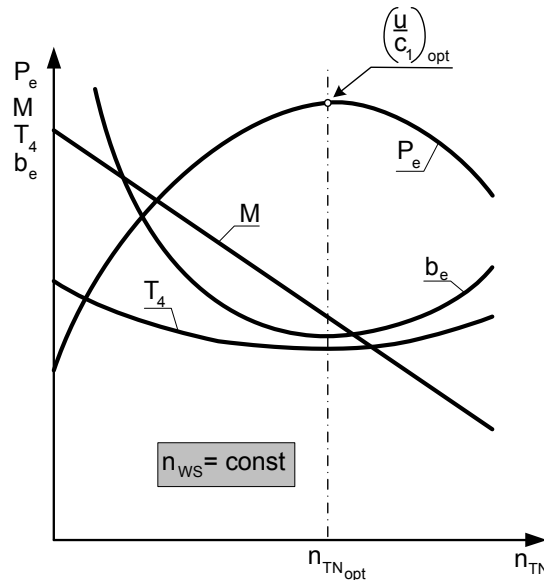
gdzie:  $\varphi$  - współczynnik strat prędkości bezwzględnej,  
 $\psi$  - współczynnik strat prędkości względnej.

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 powyższej charakterystyki przedstawia rysunek 3.

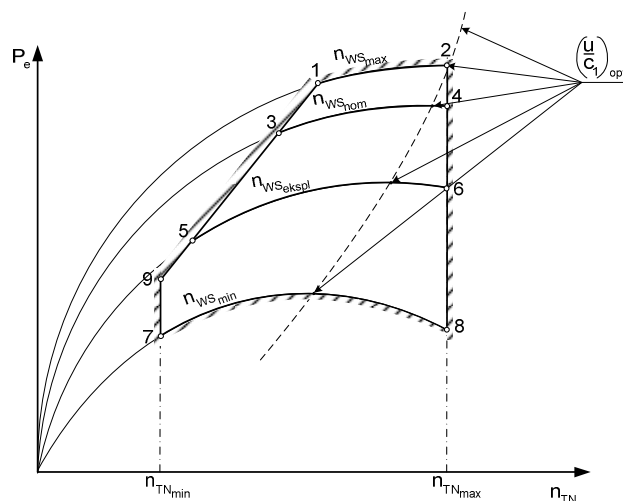
Dla mniejszych prędkości obrotowych turbiny napędowej niż prędkość optymalna następuje spadek mocy turbiny przy jednoczesnym wzroście momentu obrotowego, temperatury spalin za turbiną oraz jednostkowego zużycia paliwa. Należy mieć na uwadze, że maksymalnej prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin 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**.



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

Przez analogię do powyższego, 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 przedstawia rysunek 4. Poniższa charakterystyka przedstawia 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 poniższej charakterystyce możliwe jest również przedstawienie, odpowiadających poszczególnym charakterystykom mocy, przebiegów momentu obrotowego, temperatury spalin wylotowych oraz jednostkowego zużycia paliwa. Jednak, aby zapewnić czytelność i zrozumienie istoty charakterystyki powyższych wielkości nie przedstawiono. 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.

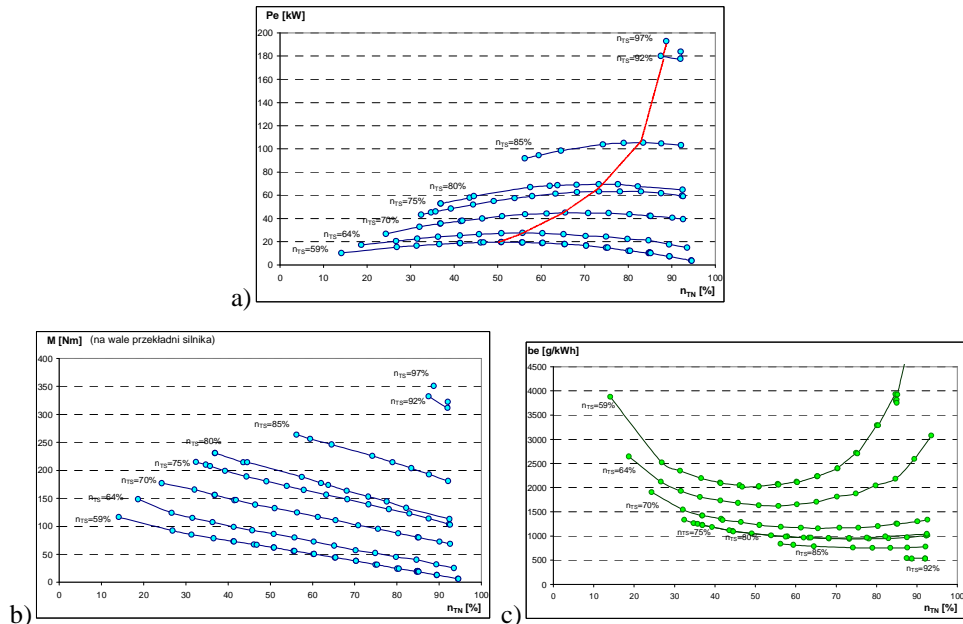


Rys. 4. Charakterystyka obrotowa-zewnętrzna okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową;

- (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;

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 pompażu 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 wówczas 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, wtedy część spalin uchodzi pulsacyjnie poprzez sprężarkę w odwrotnym kierunku. Zjawisko to jest przyczyną powstawiania uszkodzeń głównie sprężarki jak również całego silnika. Przyczyną pompażu mogą być również zakłócenia w pracy samej sprężarki, spowodowane np.: zanieczyszczeniem jej części przepływowej. Granicą niestabilnej pracy sprężarki na charakterystyce obrotowej-zewnętrznej jest linia 1-9, nazywana „linią pompażu” [6].

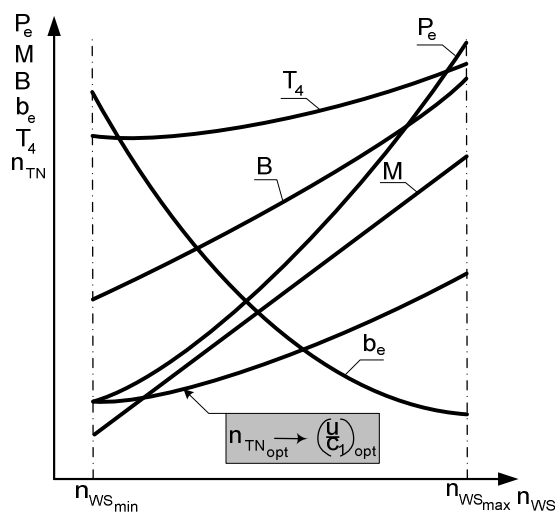
Przykładową charakterystykę obrotową-zewnętrzną turbinowego silnika spalinowego GTD-350 przedstawia rysunek 5.



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) [1]

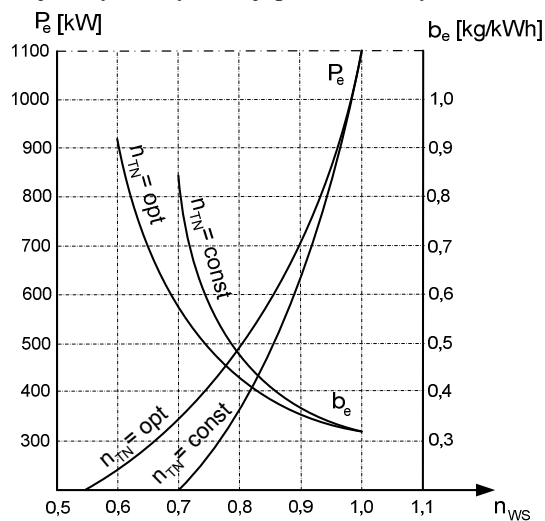
- w drugim przypadku charakterystykę obrotową można przedstawić w postaci zależności optymalnych wartości mocy użytecznej  $P_e$  i użytecznego momentu obrotowego  $M$  turbiny napędowej, a także odpowiadającym im jednostkowemu zużyciu paliwa  $b_e$  i temperatury spalin wylotowych  $T_4$  od prędkości 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 powyższej charakterystyce możliwe jest również przedstawienie zależności parametrów stanu czynnika roboczego w charakterystycznych przekrojach odpowiadających węzłowym punktom realizacji obiegu termodynamicznego silnika. Zdarza się, że rozpatrywana charakterystyka wyznaczana jest przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej odpowiadającej charakterystyce zewnętrznej maksymalnej lub nominalnej (warunkom projektowym). W takich przypadkach należy mieć 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.





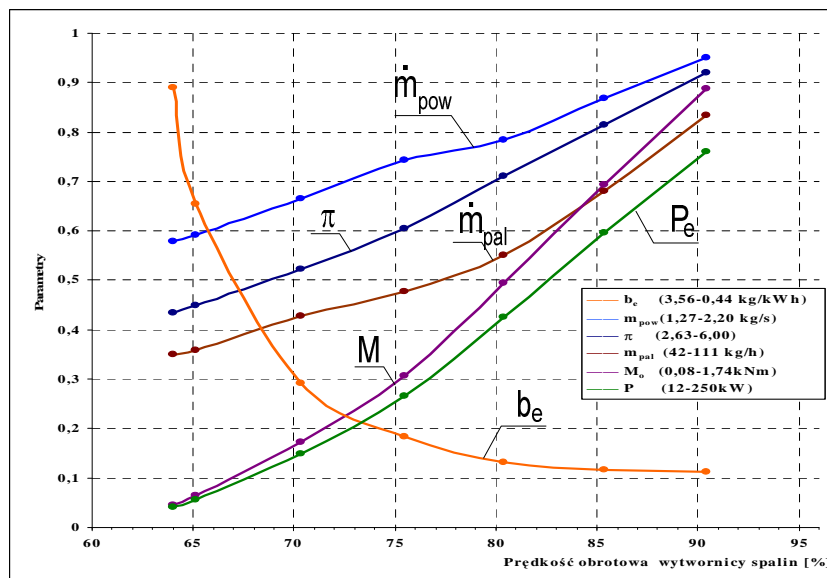
Rys. 6. Charakterystyka obrotowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową

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



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

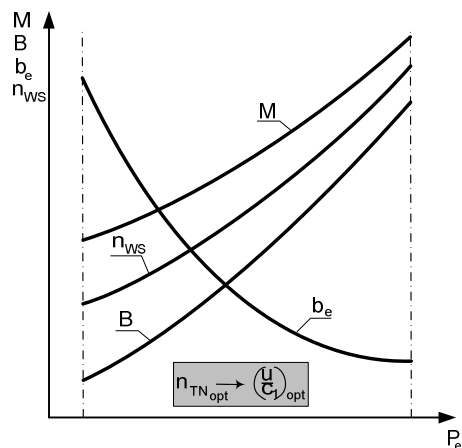
Przykładową charakterystykę obrotową turbinowego silnika spalinowego GTD-350 przedstawia rysunek 8. Poniższa charakterystyka przedstawia zależność wybranych wielkości fizycznych od prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin, przy zachowaniu optymalnych warunków pracy wolnej turbiny napędowej.



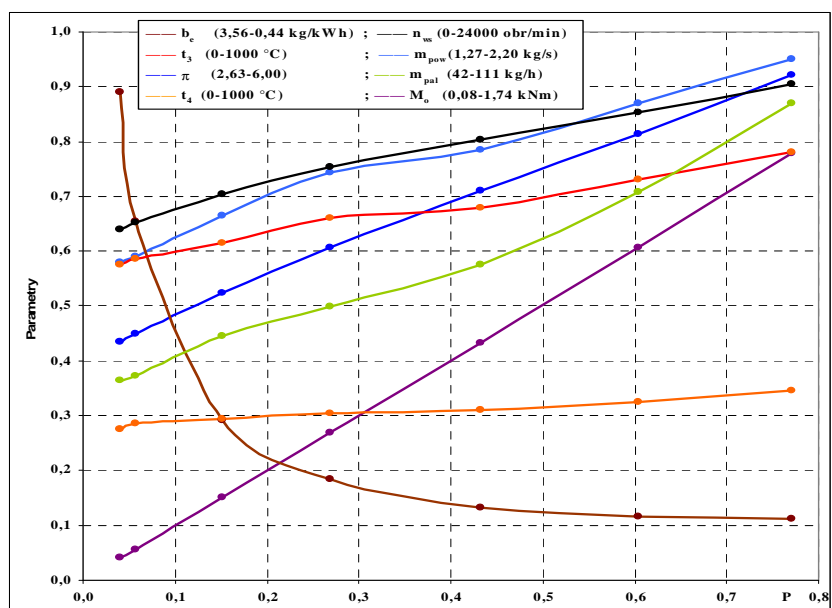
Rys. 8. Charakterystyka obrotowa turbinowego silnika spalinowego GTD-350. Zależność zmian mocy użytecznej  $P_e$ , momentu obrotowego  $M$ , jednostkowego zużycia paliwa  $b_e$ , sprężu sprężarki  $\pi$ , oraz strumieni paliwa  $\dot{m}_{pal}$  oraz powietrza  $\dot{m}_{pow}$  od prędkości obrotowej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

#### 4. 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. Przykładową charakterystykę obciążeniową turbinowego silnika spalinowego GTD-350 przedstawia rysunek 10. Poniższa charakterystyka przedstawia zależność wybranych wielkości fizycznych od mocy użytecznej silnika.



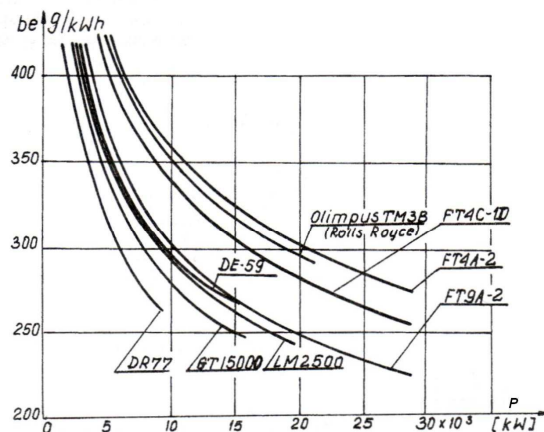
Rys. 9. Charakterystyka obciążeniowa okrętowego turbinowego silnika spalinowego z wolną turbiną napędową



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

Dysponując charakterystyką obciążeniową możliwy jest dobór najbardziej ekonomicznego zakresu pracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego współpracującego z danym odbiornikiem energii, jak również możliwość porównywania

osiągów różnych silników. Przykładowe porównanie charakterystyk obciążeniowych różnych okrętowych turbinowych silników spalinowych przedstawia rysunek 11.



Rys. 11. Przykładowe porównanie charakterystyk obciążeniowych różnych okrętowych turbinowych silników spalinowych [8].

Z zależności przedstawionych na powyższym rysunku wynika ogromny wzrost zużycia paliwa przy występowaniu częściowych obciążeń okrętowego turbinowego silnika spalinowego. Nieporównywalnie większe niż w przypadku okrętowych tłokowych silników spalinowych. Dlatego też, 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 najekonomiczniej. Ciekawym jest również fakt, że wszystkie typy silników mają zbliżone zużycie paliwa na obciążeniach minimalnych, a jedynie widoczne różnice w zużyciu paliwa występują przy ich obciążeniach nominalnych.

## 5. CHARAKTERYSTYKI WSPÓŁPRACY OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO Z ODBIORNIKIEM ENERGII

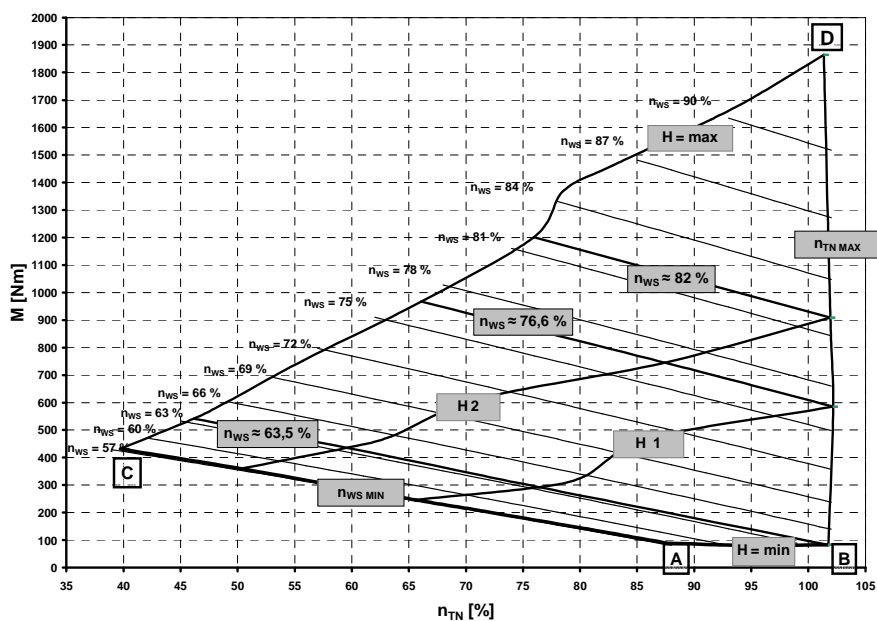
Charakterystyka współpracy okrętowego turbinowego silnika spalinowego z odbiornikiem energii, często nazywana polem pracy, przedstawia sobą pole możliwych osiągnięć silnika w zależności od momentu oporowego pochodzącego od odbiornika energii. Pole możliwych osiągnięć ograniczone jest minimalnymi oraz 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. Jednak aby zapewnić czytelność i zrozumienie istoty charakterystyki powyższych wielkości nie przedstawiono.



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

Powyższa charakterystyka ograniczona jest następującymi liniami: minimalnej mocy silnika AC, minimalnej AB oraz maksymalnej CD nastawy hamulca oraz maksymalnej

prędkości obrotowej wolnej turbiny napędowej BD. Wewnątrz charakterystyki można wyróżnić linie stałych, wybranych prędkości obrotowych wytornicy 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 zmiennym. 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 [4]:

- 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 i 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 zachowanie optymalnych warunków pracy dla wolnej turbiny napędowej, a tym samym wykorzystanie jej optymalnej mocy dla różnych zakresów pracy silnika. Przykładem takiego sposobu sterowania obciążeniem jest układ napędowy fregaty typu Oliver Hazard Perry.

## 6. METODY WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK

Wyznaczania charakterystyk eksploatacyjnych badanego silnika 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. ilość 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 eksploatacyjne badanego silnika, a następnie sprowadza się je (redukuje) do warunków normalnych fizycznych ( $T_{0t}=273\text{ K}$ ,  $p_{0t}=101325\text{ Pa}$ ) 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, na 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 [5].

Charakterystyki eksploatacyjne wyznaczone na stanowisku hamownianym mogą w różnym stopniu różnić się od tych, które występują w warunkach siłownianych. Dlatego też zalecane jest wyznaczanie charakterystyk 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. Podczas takich badań ważne jest zapewnienie pływania okrętu w zbliżonych warunkach zewnętrznych pływania z zachowaniem zbliżonej wyporności okrętu. Przed przystąpieniem do badań należy dokonać kalibracji wszystkich torów pomiarowych rejestrowanych wielkości fizycznych, okrętowych jak również instalowanych dodatkowo. Bardzo ważnym zagadnieniem podczas badań w warunkach okrętowych jest pomiar i rejestracja użytecznego momentu obrotowego, który jednoznacznie określa obciążenie badanego układu napędowego oraz 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.

## 7. PODSUMOWANIE

Z odmienną specyfiką eksploatacji okrętowych turbinowych silników spalinowych, związane są również ich charakterystyki eksploatacyjne. Z uwagi na to, że dostępna literatura przedstawia informacje na temat powyższych charakterystyk w sposób wybrany lub fragmentaryczny, w niniejszym artykule postanowiono to uporządkować i przedstawić w sposób uporządkowany i całościowy.

Możliwość wyznaczenia 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. Powyższe informacje mogą być również wykorzystywane podczas modernizacji lub konstruowaniu nowych konstrukcji 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, mających wpływ na gotowość bojową okrętu, a co za tym idzie generuje również duże i nieplanowane koszty w procesie eksploatacji.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Gryglewski W., Niedziałek B.: *Możliwości wykorzystania silnika GTD-350 w zastosowaniach nielotniczych*, VI Sympozjum Naukowo-Techniczne: Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych, AMW–WAT 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] Nowak M.: *Siłownie okrętowe dla mechaników – okrętowy układ napędowy*, AMW, Gdynia 1983.
- [5] Pojawa B.: *Stanowisko laboratoryjne dwuwirnikowego silnika turbinowego*, XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO, AMW, Gdynia 2005.
- [6] Речистер В. Д.: *Справочник инженера–механика судовых газотурбинных установок*, Судостроение, Ленинград 1985.
- [7] Pudlik W.: *Termodynamika*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.
- [8] Wojnowski W.: *Okrętowe siłownie spalinowe część I*, AMW, Gdynia 1998.