

## WIELOSYPOTOMOWY SYSTEM DIAGNOZOWANIA OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Adam CHARCHALIS

Akademia Marynarki Wojennej  
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów  
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, e-mail: [AChar@amw.gdynia.pl](mailto:AChar@amw.gdynia.pl)

### Streszczenie

W referacie przedstawiono problemy związane z wdrożeniem i eksploatacją turbinowych silników spalinowych do napędu szybkich rakietowych okrętów wojennych. Zaprezentowano system diagnozowania silników turbinowych, opracowany przez autora i wdrożony na okrętach Marynarki Wojennej RP.

Słowa kluczowe: okrętowy silnik turbinowy, diagnostyka techniczna, napęd okrętowy

### MULTI-SYMPOTMS SYSTEM OF DIAGNOSING OF MARINE GAS TURBINES

### Summary

There are presented problems connected with initiation and use of gas turbine engines assembled on high speed missile battle ship. The system of diagnosing of gas turbine engines elaborated by author and inculcated in the Polish Navy is presented as well.

Keywords: marine gas turbine, technical diagnostics, ships propulsion

## 1. WSTĘP

Układy napędowe okrętów wojennych, a szczególnie okrętów uderzeniowych są konstrukcjami dużej mocy. Zainstalowana moc siłowni osiąga 100000 kW. Wysokie zapotrzebowanie mocy powoduje, że w napędach tych powszechnie stosowane są turbinowe silniki spalinowe. Współczesne okrętowe turbinowe silniki spalinowe charakteryzują się mocą do 30 MW oraz małą masą jednostkową wynoszącą nawet 0,2 kg/kW.

W Polskiej Marynarce Wojennej eksploatowane są trzy klasy okrętów z napędem turbinowym, przy czym konfiguracja układu napędowego każdego z nich jest inna, wynikająca z zadań dla danej klasy okrętów oraz tradycji morskich wytwórcy okrętów.

Okręt wojenny charakteryzuje się tym, że projektowany jest na maksymalną prędkość pływania, stąd wysoka moc zainstalowanych silników. Jednakże około 95% czasu eksploatacji realizowane jest przy obciążeniach częściowych, w tym w znacznej części przy obciążeniach bardzo niskich, zbliżonych do biegu jałowego. Taki sposób eksploatacji okrętów rzutuje na konfigurację układu napędowego. Układy napędowe okrętów tego typu są z reguły wielosilnikowe, pracujące w układach kombinowanych, przy czym obserwuje się tendencje do stosowania silników jednego typu.

Kombinowany układ napędowy korwety rakietowej składa się z dwóch silników marszowych o mocy po 3000 kW oraz dwóch silników szczytowych o mocy po około 9000 kW połączonych ze

sobą sprzęgłami, przekładniami i wałami napędzających dwie śruby superkwitacyjne. Dla zapewnienia odpowiedniej ekonomiczności napędu zastosowano wał poprzeczny umożliwiający pracę dowolnego silnika marszowego na dwie śruby.



Fregata  
D = 3 600 t  
v = 29 w



Korweta  
D = 490 t  
v = 45 w



Niszczyciel  
D = 5 000 t  
v = 32 w

Rys. 1.1. Okręty Marynarki Wojennej RP wyposażone w turbinowe silniki spalinowe

Konfiguracja układu napędowego zapewnia ekonomiczną pracę układu napędowego w całym zakresie prędkości pływania przy pracy jednego lub dwóch silników marszowych, dwóch silników szczytowych oraz wszystkich silników.

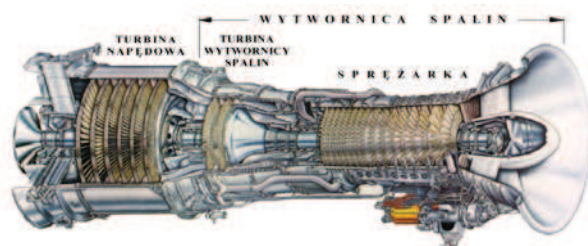
Ze względu na wysoki koszt włączenia nawet jednego rodzaju silnika do systemu logistycznego, koncepcja posiadania dostępnej rodziny silników turbinowych o różnej mocy jest raczej nierealna. Obserwuje się tendencję do standaryzacji i stosowania jednego typu silnika oraz ciągłej jego modyfikacji.

Przykładem takiego podejścia są układy napędowe okrętów różnych klas z silnikami LM 2500. Silniki te na okręcie zabudowywane są modułowpo dwa silniki o mocy do 30 MW każdy pracujące przez przekładnię redukcyjną, na jeden wał i śrubę o skoku nastawnym.

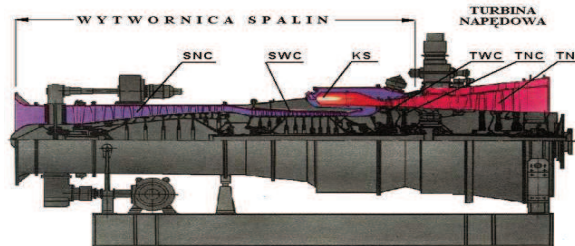
W zależności od klasy okrętu stosowany może być taki jeden moduł (fregata), dwa moduły (niszczyciel) lub trzy moduły (lotniskowiec).

## 2. WARUNKI PRACY SILNIKÓW TURBINOWYCH NA OKRĘTACH

Okrętowe turbinowe silniki spalinowe oparte są na adaptacji lotniczych silników odrzutowych. Silnik LM 2500 jest silnikiem dwuwirnikowym, natomiast silniki ukraińskie są trójwirnikowe.



$$n_{WS} = 10500 \text{ obr/min}, n_{TN} = 3600 \text{ obr/min}$$



$$n_{NC} = 14500 \text{ obr/min}, n_{WC} = 20000 \text{ obr/min}, n_{TN} = 10000 \text{ obr/min}$$

Rys. 2.1. Konstrukcje silników turbinowych

Turbinowe silniki spalinowe na okrętach pracują w specyficznych warunkach, które w znacznym stopniu wpływają na zmianę ich charakterystyk eksploatacyjnych oraz mogą być przyczyną zwiększonego ich zużycia, a nawet awarii.

Specyfika okrętowa, czy też morska ma wpływ na silniki wszelkiego rodzaju, ale przede wszystkim na silniki turbinowe.

Na okręcie silniki turbinowe pracują w warunkach permanentnych kołysań i olbrzymich obciążeń udarowych itp. Obciążenia te oddziałują na elementy silnika, a szczególnie na uszczelnienia labiryntowe i łożyska. Powietrze przepływające przez silnik niesie ze sobą wodę i sól morską, opary olejów, podsysane spaliny z pracujących silników, a także w rejonach przybrzeżnych pyły przemysłowe. Zanieczyszczenia z powietrza roboczego osadzają się na powierzchniach elementów części przepływowej w postaci smolistej substancji o różnorodnej zawartości cząstek stałych. Stąd okresowo należy przeprowadzać oczyszczenie części przepływowej silników.

Powszechne wprowadzanie silników turbinowych w budownictwie okrętów wojennych, wynika głównie z dwóch powodów:

- zapewnienie odpowiedniego poziomu mocy;
- niskiego poziomu generowanych szumów podwodnych.

## 3. BAZA DIAGNOSTYCZNA SILNIKÓW TURBINOWYCH AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ

Diagnozowanie silników turbinowych okrętów Polskiej Marynarki Wojennej rozpoczęto w 1985 r. Powodem dla zorganizowania zespołu diagnostycznego było wprowadzenie do eksploatacji korwet wyposażonych w nowe jakościowo silniki turbinowe i występujące pewne problemy w ich eksploatacji.

Opracowany wielosymptomowy system diagnozowania turbinowych silników spalinowych składa się z szeregu stanowisk badawczych i diagnostycznych zarówno lokomocyjnych jak i stacjonarnych. Diagnozowanie silnika oparte jest na analizie wielkości charakteryzujących stan techniczny silnika i elementów przeniesienia napędu uzyskanych podczas pomiarów bezpośrednich w ruchu na okręcie jak też pomiarów pośrednich w bazie.

Analizy diagnostyczne przeprowadza się w oparciu o pomiary:

- parametrów eksploatacyjnych ;
- drgań silnika, przekładni i wałów napędowych ;
- właściwości fizyko-chemicznych oraz zanieczyszczeń mechanicznych oleju silników i przekładni;
- endoskopowych, części przepływowej silnika i przekładni ;
- laserowych, elementów połączeń układu przeniesienia momentu obrotowego;
- termowizyjnych, połączeń rurociągów oraz wymienników ciepła.

Podział strukturalny silnika turbinowego ułatwia przeprowadzenie jego diagnozowania. Układ napędowy z silnikami turbinowymi podzielono na następujące podzespoły:

- układ automatyki sterowania i zabezpieczeń
- trakt przepływowy
- układ kinematyczny z elementami instalacji olejowej

- wały i sprzęgła łączące poszczególne silniki i przekładnie
- instalacje sprężonego powietrza
- komora spalania i aparatura paliwowa.

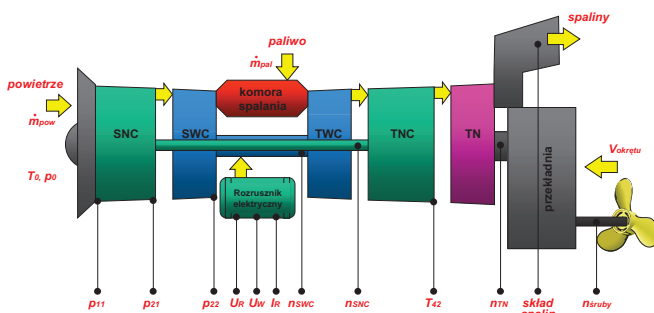
#### 4 WYKORZYSTANIE WYNIKÓW BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH

Badania eksploatacyjne dają dużo informacji diagnostycznej. Pozwalają na ocenę stanu technicznego oraz porównanie go ze stanem wzorcowym, którym mogą być wyniki poprzednich badań lub prób zdawczych okrętu

Opracowano trzy komputerowe zestawy pomiarowo-rejestrujące przeznaczone do badań silników turbinowych w czasie rozruchu, akceleracji i deceleracji oraz pracy ciągłej na różnych obciążeniach. Na rys. 4.1 przedstawiono schemat zbierania parametrów diagnostycznych dla siłowni z silnikami turbinowymi.

System pomiarowo-rejestrujący przeznaczony do badań stanu silników okrętowych skonstruowano tak, żeby z jednej strony silnik i otoczenie zewnętrzne nie zakłócało pracy rejestratora, a z drugiej rejestrator nie powodował zakłóceń w sieci pomiarowej i sterowania silnika.

Zrealizowano to stosując układy optoizolacji w każdym torze pomiarowym. Każdy z kanałów pomiarowych wyposażono w mikrokomputer co umożliwia jednoczesny pomiar wszystkich parametrów. Jednoczesny pomiar parametrów stanowi podstawowy warunek dla korzystania z charakterystyk silnika przy ocenie jego stanu technicznego. Sterowanie pracą rejestratora realizuje komputer centralny.



Rys. 4.1. Wielkości pomiarowe charakteryzujące stan silnika turbinowego

System pomiarowy wyposażono w zewnętrzny RAM-DYSK zasilany z własnego źródła. Umożliwia on przenoszenie zapisanych wyników pomiarowych z obszaru dużego poziomu drgań (siłownia) do bazowego systemu diagnostycznego.

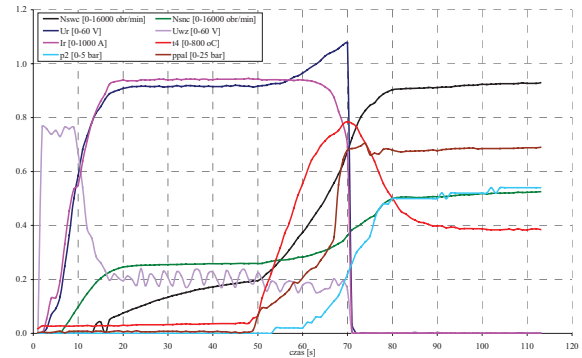
System pomiarowy pracuje w dwóch opcjach:

- pomiar parametrów rozruchu lub innych stanów przejściowych;
- pomiar parametrów pracy ciągłej.

Systematyczne badania silników turbinowych przeprowadzane na okrętach RP wykazały, że proces rozruchu i zatrzymanie może być cennym źródłem

informacji diagnostycznej pozwalającej na oszacowanie stanu technicznego silnika, szczególnie w części dotyczącej traktu przepływowego, ułożyskowania, aparatury sterującej i zabezpieczeń oraz aparatury paliwowej.

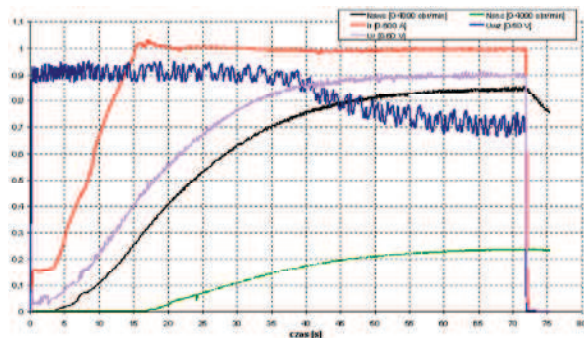
Na rys. 4.2 przedstawiono przebiegi procesu rozruchu. Przebieg procesu daje możliwość regulacji układów automatyki rozruchowej.



Rys. 4.2. Przebieg procesu rozruchu silnika turbinowego

Opracowane metodyki pozwalają szacować stan techniczny silnika na podstawie pomiaru wielkości charakteryzujących rozruch, co można wykonać w porcie bez konieczności wyjścia okrętu w morze.

Dla oceny układu napędowego opracowano zablokowany komputerowy rejestrator, który umożliwia jednoczesne zbieranie informacji diagnostycznej wszystkich silników napędowych. Pomiar ten pozwala analizować charakterystyki napędowe oraz stan silników turbinowych przy pracy na różnych obciążeniach i w różnych warunkach. Zastosowanie tego rejestratora, który umożliwia jednoczesny pomiar około 160 wielkości charakteryzujących eksploatację silnika znacznie skraca czas diagnozowania podczas prób morskich. Badania te pozwalają na przeprowadzenie analizy trendu parametrów charakteryzujących stan silnika tj. jak poślizgi prędkości obrotowej, temperatur i ciśnień co pozwala na optymalizację obsługi silnika tj. np. oczyszczanie przestrzeni wewnętrznych silnika, regulację aparatury paliwowej w wyniku prowadzonej analizy zarejestrowanego pola temperatur, mierzonego na obwodzie traktu przepływowego za komorą spalania przez 20 termopar.

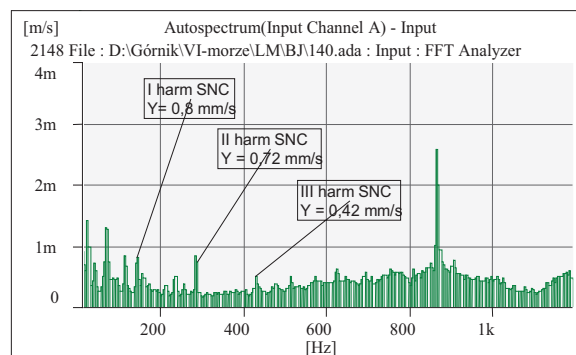


Rys. 4.3. Przebieg procesu akceleracji silnika

Dla pomiaru parametrów w procesach dynamicznych tj. akceleracja i deceleracja silników opracowano układ pomiarowy, który od poprzednich różni się tym, że czasy próbkowania są znacznie krótsze do 0,01, co umożliwia analizę wielkości w stanach przejściowych np. zwiększenie obciążenia.

## 5. POMIAR I ANALIZA WIDMOWO-KORELACYJNA DRGAŃ

W diagnostyce silników turbinowych wyniki pomiarów drgań stanowią jedno z podstawowych źródeł informacji diagnostycznych. Pomiar i analiza widmowo-korelacyjna drgań umożliwia ocenę stanu łożyskowania, ułopotkowania oraz wyważenia wirników.



Rys. 5.1. Analiza drgań zarejestrowanych na korpusie sprężarki

Pomiary wielkości wibroakustycznych wykonywane są analizatorem sygnałów. Urządzenie to pozwala na analizę drgań w zakresie częstotliwości 0,35÷22,4 kHz. Analizatory drgań wyposażone są w oprogramowanie umożliwiające bezpośrednią komunikację z komputerem bazowym w celu archiwizacji wyników badań. W systemie pomiarowym zastosowano czujniki, które mogą być wykorzystane do pomiarów drgań w części wysokotemperaturowej silnika o temp. dochodzącej do 300°C.

System pomiarowy analizuje poziom całkowity drgań oraz odpowiednie harmoniczne, dla których wymuszeniem jest niewyważenie wirników, zużycie lub uszkodzenie łożysk tocznych oraz łopatek.

## 6. LASEROWY POMIAR WSPÓŁOSIOWOŚCI WAŁÓW

Odształcenia kadłuba oraz osiadanie fundamentów silników i przekładni redukcyjnych w siłowni, będące skutkiem obciążeń udarowych i osłabienia elementów struktury konstrukcyjnej, są najczęstszą przyczyną utraty współosiowości linii wałów okrętu. Efektami wtórnymi są załamanie oraz przemieszczenie osi wałów, które prowadzą do powstania drgań przenoszonych na podpory łożysk transmitujących moment obrotowy, a w konsekwencji mogących doprowadzić do awarii jednego lub kilku elementów układu napędowego. Metoda laserowa pozwala na ocenę współosiowości.

Mając na uwadze zagrożenia wynikające z przekroczenia tolerancji współosiowości oraz czasochłonność pomiaru odchyłek metodami klasycznymi, opracowano i wdrożono metodę kontroli odchyłek współosiowości opartą na analizie sygnałów wibroakustycznych, będących rezultatem emisji energii od załamania osi wału łączącego silnik z przekładnią lub przekładnie z pędnikiem.

## 7. BADANIA OLEJU NA ZAWARTOŚĆ ZANIECZYSZCZEŃ

Stan zanieczyszczenia oleju smarnego silników i przekładni stanowi bardzo ważne źródło informacji diagnostycznej. Stąd też oprócz wykonywania zgodnych z zaleceniami okresowych analiz oleju przeprowadza się badania oleju na zawartość w nim zanieczyszczeń w tym metalicznych metodą mikroskopii optycznej i rentgenowskiej fluorescencji radioizotopowej.

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano metodykę oceny trendu zmian stopnia zanieczyszczenia oleju wynikającą z zużycia silnika z prognozą wymian oleju i innych obsługa silnika.

## 8. ENDOSKOPIA

Eksploracja lotniczych silników turbinowych JT6D wykazała, że ponad 50% uszkodzeń eksploatacyjnych wykrywa się metodą endoskopową.

Na wyposażeniu systemu diagnostycznego jest fiberoskop oraz dwa boroskopy. Ogląd wewnętrzny silnika można prowadzić przez otwory wziernikowe lub technologiczne o średnicy większej od 8,4 mm.

Zastosowane zestawy endoskopowe umożliwiają ogląd wewnętrznych przestrzeni silnika, pomiar uszkodzeń oraz wykonanie dokumentacji fotograficznej przy wykorzystaniu aparatu cyfrowego.

Gromadzona dokumentacja fotograficzna pozwala na ocenę aktualnego stanu elementów głównie części przepływowej oraz ewentualnego rozwoju uszkodzeń. Należy podkreślić, że metody endoskopowe są także bardzo efektywne w ocenie elementów szybkoobrotowych silników tłokowych np. ocena przyczyny zatarć silników M503 lub M520, które mają odpowiednio 42 lub 56 cylindrów.

## 10. WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

Systematyczne diagnozowanie silników turbinowych przeprowadzane prawie od 20 lat pozwala na wyciągnięcie wniosków odnośnie słuszności i celowości takiego postępowania. Szczególnie jest to ważne i istotne w okresie gdy na eksploatację, a szczególnie na remonty przeznaczone są ograniczone środki. Taka sytuacja stwarza więc konieczność przejścia na eksploatację wg stanu technicznego. Każde odstawienie silnika, czy okrętu z eksploatacji spowodowane przekroczeniem jego okresu międzyremontowego faktycznie powoduje dekapitalizację sprzętu i jego degradację. Odstawienie z eksploatacji okrętu w oczekiwaniu na remont, może spowodować, że po kilku latach remont ten będzie już nieopłacalny. Stąd celowym jest takie prowadzenie eksploatacji z wykorzystaniem wyspecjalizowanej diagnostyki, która umożliwi przedłużenie czasu dalszej eksploatacji, ewentualnie przy obniżeniu zakresu dopuszczalnych obciążeń. Ta filozofia eksploatacji zastosowana w ostatnich latach w Marynarce Wojennej pozwala na eksploatację okrętów projektu 1241, pomimo, że czasowy zasób pracy silników już dawno się wyczerpał.

## LITERATURA

- [1] CHARCHALIS A.: Diagnostyka okrętowych turbinowych silników spalinowych. Wyd. AMW, 1991.
- [2] CHARCHALIS A.: Diagnosing power plants and specialized equipment used on Poland's Navy Warship. II International Congress of Technical Diagnostics. DIAGNOSTYKA 2000.
- [3] CHARCHALIS A.: Applications of diagnosing of naval gas turbines. Int. Congress on COMADEM 2001, Manchester, UK.
- [4] CHARCHALIS A.: Multi-symptom diagnostics of naval gas turbines. International Carpathian Control Conference, Krynica 2001.
- [5] CHARCHALIS A., GRZĄDZIELA A., STAPERSMA D.: Condition Monitoring and fault diagnosis of Naval Gas Turbines. ASME TURBO EXPO-Power for Land, Sea & Air, Amsterdam 2002.
- [6] CHARCHALIS A., WIRKOWSKI P., ZAJĄC J.: Ocena i prognoza stanu technicznego okrętowego turbinowego silnika spalinowego LM 2500. XXX Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn” 2003, 19 s.



prof. dr hab. inż. Adam CHARCHALIS, ur. w 1944 r. w Przemysłu. Studia I stopnia o kierunku „Maszyny i siłownie okrętowe” ukończył w 1968 r. w Wyższej Szkole Marynarki Wojennej, a studia II stopnia w 1971 r. na Wydziale Okrętowym Politechniki Gdańskiej. W latach 1968 - 1971 był oficerem mechanikiem na trałowcu ORP „Krogulec”. Od 1971 r. pracuje w Wyższej Szkole Marynarki Wojennej, obecnie Akademia Marynarki Wojennej, pełniąc obowiązki st. asystenta i adiunkta, od 1979 r. zastępcy Komendanta Instytutu Konstrukcji i Napędów Okrętowych, a od 1990 r. do 2003 r. Komendanta tegoż Instytutu. W latach 1994 - 2003 pełni obowiązki dziekana Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej. Doktorat w 1978 r., habilitacja 1984 r., tytuł profesora 1994 r. Jego zainteresowania badawcze i dydaktyczne to „Siłownie” i „Napędy okrętowe”, „Projektowanie okrętów” oraz „Diagnostyka Maszyn Okrętowych”. Stworzył system diagnozowania układów napędowych okrętów z turbinowymi silnikami spalinowymi, który został wdrożony na okrętach Marynarki Wojennej. Jest członkiem wielu organizacji naukowych krajowych i zagranicznych np. ECOR, autorem 3 monografii, 8 podręczników i ponad 250 prac drukowanych w różnych czasopiśmie i materiałach konferencyjnych.