ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LII NR 3 (186) 2011

Andrzej Grządziela
Akademia Marynarki Wojennej

OKREŚLANIE CHARAKTERYSTYK DRGANIOWYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH W STANACH NIEUSTALONYCH

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania charakterystyk drganiowych okrętowych turbinowych silników spalinowych. Zaproponowano sposób akwizycji danych z pomiarów w stanach nieustalonych oraz metodykę badań procesów drganiowych zachodzących w procesach zimnego i gorącego rozruchu oraz wybiegu wirnika wytwornicy spalin.

Słowa kluczowe:
silnik turbinowy, charakterystyki, drgania.

WSTĘP

Okrętowe turbinowe silniki spalinowe pracując w otwartym układzie przepływu czynnika roboczego, zasysają znaczne ilości powietrza zawilgoconego parą wodną, kroplami wody morskiej i opadów atmosferycznych. Środowisko morskie, drgania fundamentów spowodowane pływaniem na fali oraz pracą śrub okrętowych, kołysanie wzdłużne i poprzeczne i tym podobne czynniki wpływają systematycznie na pogorszenie się stanu technicznego podzespołów silników. Konsekwencją wspomnianych oddziaływań jest pogarszanie się stanu technicznego kanałów przepływowych maszyn wirnikowych (osady, erozja itp.). Znaczna część tych zmian znajduje odzwierciedlenie we wzroście energii dyssypowanej — wibroakustycznej.

ZAKRES BADAŃ

Analizy pomiarów drgań, przeprowadzane w trybie *off-line*, dla stanów ustalonych wykonywane są zwykle w celu wykrycia symptomów nieprawidłowej

pracy silnika — pogorszenia jego stanu technicznego [1, 2, 4, 5]. Najczęściej badania takie służą do jakościowej identyfikacji eksploatacyjnego niewyrównoważenia wirnika podczas eksperymentów biernych wykonanych w rzeczywistych warunkach pracy silnika na okręcie. Wybór punktów pomiarowych dyktują realne możliwości zainstalowania czujników kontrolowanych wielkości, bez ingerencji w konstrukcję. O ich rozmieszczeniu decyduje analiza teoretyczna oddziaływań oraz struktura silnika [1]. Celem badań było ustalenie możliwości rozpoznawania podstawowej niesprawności silników turbinowych — niewyrównoważenia zespołu wirnikowego poprzez pomiar parametrów drganiowych w stanach nieustalonych.

Traktując wirnik silnika turbinowego jako niewyrównoważony, siłę reakcji prostopadłej do osi obrotu wału wirnika opisano równaniem [3]:

$$F = m\omega^2 r \cdot \sin \omega t \tag{1}$$

i stosując równanie różniczkowe drgań wymuszonych w postaci:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_d^2 x = p(t) = \frac{F}{m}, \tag{2}$$

gdzie: tłumienie $h = \dfrac{c}{2m}$; częstość $\omega_d = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$, (3)

otrzymano zależność dla wirnika niewyrównoważonego w postaci:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_d^2 x = e\omega^2 \sin \omega t, \tag{4}$$

gdzie:

$$e = \frac{m_n r}{m} \tag{5}$$

jest niewyrównoważeniem właściwym, przypadającym na jednostkę masy wirnika.

Ponieważ ruch wirującego wirnika opisano równaniami:

$$x = a\cos \omega t + b\sin \omega t; \tag{6}$$

$$\dot{x} = -a\omega \sin \omega t + b\omega \cos \omega t; \tag{7}$$

$$\ddot{x} = -a\omega^2 \cos \omega t + b\omega^2 \sin \omega t, \tag{8}$$

to podstawiając związki (6), (7) i (8) do związku (4), otrzymano:

$$(-a\omega^2 + 2hb\omega + a\omega_d^2)\cos \omega t + (-b\omega^2 - 2ha\omega + b\omega_d^2)\sin \omega t = e\omega^2 \sin \omega t. \tag{9}$$

Tożsamość (9) będzie spełniona, kiedy:

$$a = -e\frac{2h\omega^3}{(\omega_d{}^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}; \tag{10}$$

$$b = e\frac{\omega^2(\omega_d^2 - \omega^2)}{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + 2h^2\omega^2}. \tag{11}$$

Całka szczególna (7) przyjmie wówczas postać:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \phi_0), \tag{12}$$

gdzie:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{e\omega^2}{\sqrt{(\omega_d^2 - \omega^2) + 4h^2\omega^2}}; \tag{13}$$

$$\mathrm{tg}\,\phi_0 = -\frac{a}{b} = \frac{2h\omega}{\omega_d^2 - \omega^2}. \tag{14}$$

Rozwijając równanie ruchu w szereg trygonometryczny Fouriera, przy uwzględnieniu wielu rzeczywistych składowych A_i, uzyskano sygnał reprezentowany w postaci kilku zmiennych zależnych A_i określonych dla różnych częstości, w tym harmonicznych ω_i [4]. Ponieważ rejestrowane sygnały są uśredniane czasowo, a sam sygnał drgań badany w trybie *free-run* nie jest synchronizowany, więc wstępnie przy pomiarze sygnału wpływ kąta fazowego φ_i można pominąć. Z powyższego wynika, że powstałe drgania, wynikające z niewyrównoważenia, są drganiami harmonicznymi o podstawowej częstości siły wymuszającej równej częstości wirowania wału. Rejestrowana wartość amplitudy A, jak widać z (13), będzie funkcją liniowo zależną od niewyrównoważenia i od prędkości obrotowej w drugiej potędze. Wynika z tego wniosek, że aby badania bez sygnału synchronizującego były powtarzalne, należy je wykonywać przy ustabilizowanym obciążeniu i stałej prędkości obrotowej.

Ze względu na zmiany wartości modułu Younga w funkcji temperatury przyjęto, że poprawnym miejscem pomiaru na silniku jest „zimny" punkt podparcia wirnika — gniazdo łożyska przedniego lub środkowego sprężarki wytwornicy spalin — GG, a kierunek pomiaru zgodny z wektorem reakcji odśrodkowej — promieniowy. Ponieważ równania różniczkowe opisujące ruch wału mają charakter nieliniowy, należy uwzględnić zakres częstotliwości odpowiadający I, II i III harmonicznej sygnału podstawowego.

Do wykonania badań weryfikacyjnych użyto systemu PULSE v.12.0 oraz piezoelektrycznych czujników przyspieszeń drgań. Przetworniki pomiarowe zamontowano

w pobliżu czujników okrętowego systemu monitoringu na kołnierzu sprężarki, prostopadle do osi wirowania oraz nad środkowym łożyskiem turbiny napędowej.

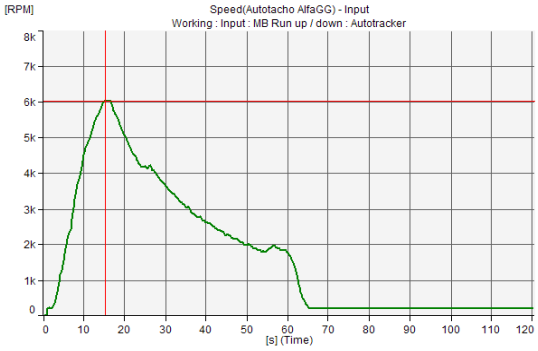
CHARAKTERYSTYKI PARAMETRÓW DRGANIOWYCH W PROCESIE AKCELERACJI I DECELERACJI SILNIKA LM 2500

Analiza parametrów drganiowych w stanach nieustalonych jest rzadko stosowana w systemach diagnostycznych turbinowych silników spalinowych. Podstawową przyczyną utrudniającą jej stosowanie jest konieczność zakupu kosztownej aparatury, występowanie gwałtownych zmian temperatury w obrębie wirników oraz wymóg generowania sygnałów synchronizujących prędkość obrotową wirnika. W badaniach wykorzystano system PULSE i skupiono się na procesach rozruchu i wybiegu wirnika GG celem identyfikacji pierwotnych symptomów powstającego niewyrównoważenia wirnika. Silniki LM 2500 mają trzy rodzaje rozruchu: zimny, pozorny i gorący.

Wykorzystanie pierwszego z procesów rozruchu pozwala na akcelerację wirnika GG do prędkości obrotowej nGG = 3000 obr/min w czasie około 12 sekund, natomiast rozruch gorący silnika prowadzi do uzyskania przez wirnik GG prędkości obrotowej nGG = 6000 obr/min w czasie około 15 sekund (rys. 1.). Oznacza to, że w trakcie rozruchu gorącego następuje znaczący wzrost przyspieszeń kątowych wirnika, co utrudnia identyfikację lokalnych rezonansów. Z tego powodu w dalszych badaniach stanu technicznego wirnika wykorzystano głównie pierwszy z procesów rozruchowych. Wstępne testy wykonano z zastosowaniem synchronizmu sygnałów, rejestrując prędkość obrotową wirnika optycznym znacznikiem będącym elementem okrętowego systemu monitoringu silników LM 2500 (rys. 2.). Kolejne badania umożliwiły wykonanie charakterystyk z wykorzystaniem procedury AUTOTRACKING, bez znacznika kątowego na wale wirnika.

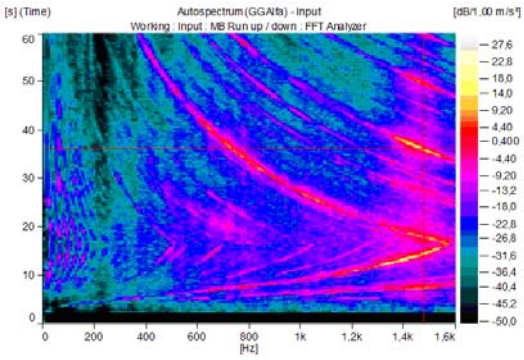
Badania w stanach nieustalonych mają na celu identyfikację lokalnych rezonansów oraz pierwotnych uszkodzeń zmęczeniowych ujawniających się w sposób jednoznaczny w procesie akceleracji i deceleracji wirnika. Czas procesu rozruchu zimnego razem z wybiegiem wynosi około 110 sekund, co umożliwia pełny zapis danych przez dowolny system analityczno-pomiarowy.

Rejestrowanie sygnałów drganiowych w trybie *free-run* nie spełnia diagnostycznych wymagań ze względu na zmienne parametry wejściowe uzależnione między innymi od ciśnienia powietrza rozruchowego, ponadto podczas realizacji pomiarów w trybie *free-run* składowe harmoniczne nie układają się równolegle, a więc ich identyfikacja jest utrudniona.



Rys. 1. Przykładowy przebieg zmian prędkości obrotowej wirnika GG przy zatrzymaniu procesu gorącego rozruchu, od 17 sekundy widoczny wybieg wirnika GG

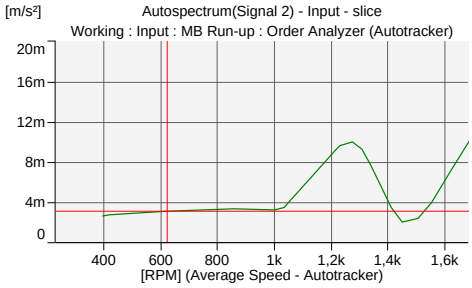
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Przykładowe widmo przyspieszeń drgań zarejestrowane w procesie rozruchu zimnego silnika LM 2500

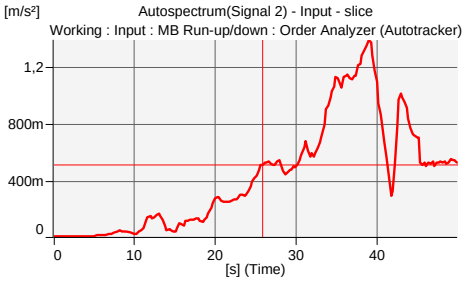
Źródło: opracowanie własne.

W trakcie badań procesu rozruchu i wybiegu analizuje się relacje wartości kolejnych harmonicznych, co charakteryzuje niewyrównoważenie wirnika [3]. Innym symptomem jest wzrost chwilowych wartości przyspieszeń drgań, który może być rozpatrywany zarówno w dziedzinie przyrostu prędkości uruchamianego wirnika (rys. 3.), jak i w dziedzinie czasu rozruchu (rys. 4.). Zastosowanie obu procedur pozwala zidentyfikować wpływ procesu spalania na zmiany drganiowych symptomów diagnostycznych, a także lokalne rezonanse. Równoczesna obserwacja parametrów drganiowych i prędkości obrotowej umożliwia znalezienie relacji pomiędzy wytypowanym sygnałem drganiowym a procesami zachodzącymi w trakcie rozruchu i wybiegu. Wyniki uzyskane z badań silników umożliwiły wykonanie wzorcowych charakterystyk AUTOTRACKING dla całej populacji badanych obiektów.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka przyspieszeń drgań (I harmoniczna) z wykorzystaniem procedury AUTOTRACKING w procesie rozruchu gorącego silnika LM 2500

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka przyspieszeń drgań (III harmoniczna) z wykorzystaniem procedury AUTOTRACKING w procesie gorącego rozruchu silnika LM 2500

Źródło: opracowanie własne.

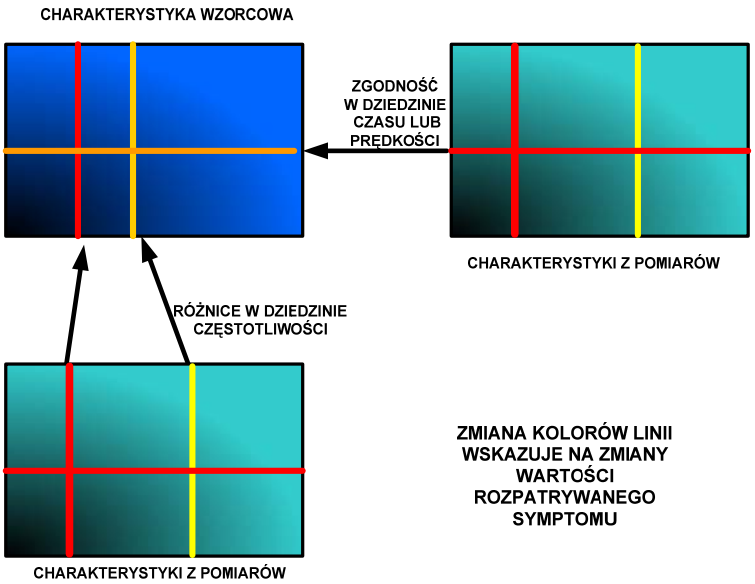
Przeprowadzone badania pilotażowe poparte wynikami symulacji numerycznych pozwoliły określić postacie drgań własnych wirnika wytwornicy spalin. Uzyskane wyniki wskazują w widmie prędkości i przyspieszeń drgań składowe, które są efektem lokalnych rezonansów występujących zarówno w procesie rozruchu, jak i wybiegu wirnika. Interesujący jest fakt, że każdy z teoretycznie identycznych silników ma własne cechy charakterystyczne w widmie drgań określone roboczo jako *fingerprints* (odciski palców).

WNIOSKI

Podstawowym narzędziem badawczym dla analiz w stanach nieustalonych przy braku możliwości pozyskania sygnału synchronizującego jest procedura AUTOTRACKING. Wykorzystanie śledzenia rzędów ma zastosowanie zarówno w procesie rozruchu, jak i wybiegu. Prowadzone analizy umożliwiły przedstawienie procesu akceleracji i deceleracji w postaci:

— analizy rzędów prędkości drgań w dziedzinie czasu lub zmian prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin;
— analizy rzędów przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu lub zmian prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin;
— analizy zmian wartości wytypowanej harmonicznej prędkości lub przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu lub zmian prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin;
— analizy zmian prędkości obrotowej wytwornicy spalin (śledzenie rzędu) w funkcji czasu (tzw. czas wybiegu).

Schemat ideowy identyfikacji zmian w rozpatrywanych analizach przedstawia rysunek 5. Podstawowym problemem, związanym z wykonywaniem pomiarów na obiektach rzeczywistych, jest wybór miejsc mocowania czujników pomiarowych. Wyniki badań oraz identyfikacja modelu numerycznego wirnika GG wskazują, że mimo trudności związanych z realnymi możliwościami instalacji czujników zaproponowany dobór punktów pomiarowych jest słuszny. Analiza teoretyczna pozwoliła określić zakres niezbędnych badań oraz przygotować program ANALIZA, którego zadaniem jest archiwizacja danych oraz ich przetwarzanie.



Rys. 5. Schemat ideowy identyfikacji zmian w stanach nieustalonych przy analizach AUTOTRACKING

Źródło: opracowanie własne.

Porównanie zarejestrowanych parametrów rozruchów i wybiegów wirnika GG w trakcie jego eksploatacji pozwala na określenie zmian stanu technicznego obiektu związanych między innymi ze zmianami momentu bezwładności (uszkodzenie łopatek lub obecność oleju w przestrzeni wewnętrznej bębna wytwornicy spalin, oporów pracy łożyskowania itp.).

BIBLIOGRAFIA

[1] Adamkiewicz A., Łutowicz M., *An Attempt to Evaluate the Technical Condition of a Ship Auxiliary Driving Unit with a Gas Turbine Engine on the Basis of Vibrations*, 'Marine Technology Transactions', Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk, 2000, Vol. 11, p. 19.

[2] Charchalis A., Grządziela A., *Diagnozowanie zespołów wirnikowych okrętowych turbinowych silników spalinowych w oparciu o analizę parametrów wibroakustycznych*, II International Congress of Technical Diagnostics, 'Diagnostyka' 2000, Politechnika Warszawska, Warszawa, 19–22.09.2000.

[3] Grządziela A., *Diagnosing of naval gas turbine rotors with use of vibroacoustic parameters*, 'Polish Maritime Research', 2000, No 3.

[4] Łączkowski R., *Wyważanie elementów wirujących*, Wydawnictwo Naukowo--Techniczne, Warszawa 1979.

[5] *Monitorowanie stanu maszyn*, Brüel & Kjaer, Naerum — Dania. K. Larsen & Sфn A/S, DK-2600 Glostrup, 1984.

DETERMINING VIBRATION CHARACTERISTICS IN MARINE TURBINE ENGINES IN TRANSIENTS CONDITIONS

ABSTRACT

The paper presents a method for determining vibration characteristics in marine turbine engines. It proposes a way of data acquisition from measurements in transient conditions, as well as methodology for investigating vibration processes occurring under run-up and shut-down engine processes and rotor coasting of gas generator.

Keywords:
turbine engine, characteristics, vibrations.