

IDENTYFIKACJA NIEWYWAŻENIA WIRNIKÓW OKRĘTOWYCH TURBINOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH W TRYBIE OFF LINE

Andrzej GRZĄDZIELA

Zakład Napędów Okrętowych, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów,
Wydział Mechaniczno – Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej
81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69
tel. (58) 626 27 24, e-mail a.grzadziela@amw.gdynia.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę nadzoru wibroakustycznego okrętowych turbinowych silników spalinowych. Analiza rejestrowanych parametrów umożliwia identyfikację niewyważenia układów wirnikowych oraz określa tolerowane wartości symptomów. Przedstawiona metoda pozwala na archiwizację i przetwarzanie danych pomiarowych dla potrzeb diagnozowania silników.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik spalinowy, diagnostyka techniczna, drgania, baza danych.

IDENTIFICATION OF ROTOR UNBALANCING OF GAS TURBINE ENGINES USING OFF LINE PROCEDURES

Summary

Paper presents a vibration method of engineering supervision of marine gas turbine engines. Analysis of measured parameters enables diagnosis of rotors unbalancing and indicates tolerated values of diagnosing symptoms. Presented method, makes possible to keep store and data processing for diagnosing process of engines.

Keywords: gas turbine engines, technical diagnostics, vibration, data base.

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień diagnozowania okrętowych turbinowych silników spalinowych jest kontrola dopuszczalnego niewyważenia wirników [1, 5]. Wielosymptomowe badania diagnostyczne na okrętach Marynarki Wojennej RP są realizowane w tym zakresie od ponad 20 lat. Powstały Zespół Diagnostyczny Okrętowych Turbinowych Silników Spalinowych realizował badania na 4 typach silników [2]. W przypadku napędu okrętów uderzeniowych procedury diagnostyczne są ograniczone z kilku przyczyn. Najważniejszą jest konieczność stałej gotowości do uruchomienia silnika związana z wymaganiami taktyczno - technicznymi. Inne to dotyczące braku informacji o parametrach konstrukcyjnych, ograniczeniach w zakresie gwarancji oraz niepełna baza zestawów naprawczych. W referacie przedstawiono metodę identyfikacji przekroczenia tolerowanych wartości niewyważenia wirników okrętowych turbinowych silników spalinowych.

2. OBIEKTY I WARUNKI BADAŃ

W skład jednostek pływających Marynarki Wojennej RP objętych stałym bazowym systemem diagnostycznym wchodzi obecnie fregaty typu Oliver Hazard Perry oraz korwety raketowe projektu

1241 RE. Oba projekty okrętów wyposażone są w kombinowane układy napędowe typu COGAG. Silniki główne jednostek projektu 1241 RE są 3 wirnikowymi silnikami turbinowymi typu DR 76 i DR 77 natomiast fregaty wyposażone zostały w 2 wirnikowe silniki typu LM 2500.

Fregaty typu Oliver Hazard Perry wyposażone zostały w okrętowy system monitoringu, który mierzy drgania silników przetwornikami zamocowanymi do wspornika łożyska środkowego wytwornicy spalin (sygnał GG) – rys. 1 oraz do wspornika łożyska tylnego turbiny napędowej (sygnał PT). Parametrem diagnostycznym jest wartość (*peak – to – peak*) skuteczna przemieszczeń drgań wywołana synchronicznie od prędkości obrotowej wirników wytwornicy spalin – GG oraz turbiny napędowej - PT. Określone wartości sygnałów ostrzegających (*warning sign*) i alarmowych (*shutdown*) reagują tylko na przekroczenie tolerowanych wartości. System nie realizuje procedur analizy trendu zmian, relacji poszczególnych harmonicznych oraz wartości harmonicznych charakterystycznych dla poszczególnych stopni wirnikowych. Nie posiada również standardowej procedury umożliwiającej swobodny dostęp do analizowanych parametrów, w tym drganiowych.



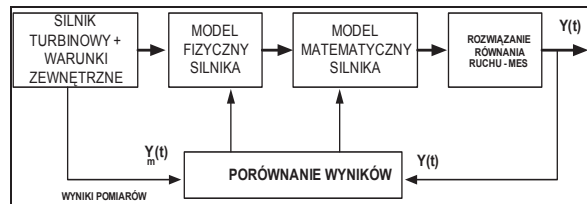
Rys. 1. Miejsce montażu akcelometru nad wytwornicą spalin

Dla potrzeb opracowanego w AMW systemu diagnostycznego wstępną analizę trendu parametrów drganiowych oparto jedynie o parametry producenta. Takie podejście umożliwiło wykorzystanie archiwizowanych wyników pomiarów przez okrętowy system pomiarowy. Badania drganiowe, według standardów producenta silników, obejmują wykonanie pomiaru wartości skutecznej przemieszczeń drgań w wymiarze [mils], co oznacza 1/1000 cala. Analiza obejmuje zakres częstotliwości odpowiadającej I harmonicznej prędkości obrotowej wytwornicy spalin - (GG/GG) i (GG/PT) oraz turbiny napędowej - (PT/PT) i (PT/GG), mierzonych jednocześnie przetwornikami zamontowanymi na wspornikach środkowego łożyska wytwornicy spalin oraz tylnego łożyska turbiny napędowej.

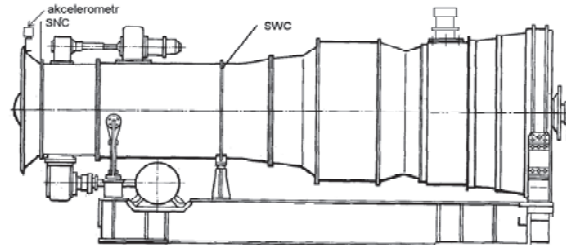
W celu uzyskania wiarygodnych parametrów diagnostycznych, badania własne turbinowych silników spalinowych LM 2500 realizowane przez zespół z Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów oparto o model diagnostyki wielosymptomowej, której jednym z zasadniczych elementów jest rejestracja oraz analiza sygnałów wibroakustycznych.

Identyfikację symptomów diagnostycznych oraz ocenę ich wrażliwości przeprowadzono poprzez analizę uproszczonych modeli wirników. Rozpatrywane badania dotyczyły wyłącznie niewyważenia dynamicznego jako podstawowego źródła reakcji na podporach w przypadku pracy wirników niewyważonych. Schemat procesu decyzyjnego wykorzystywanego dla identyfikacji niewyważenia wirników przedstawiono na rys. 2.

Układy napędowe korwet 1241 RE nie zostały wyposażone w systemy monitoringu drgań. Identyfikacja niewyważenia wirników jest realizowana w oparciu o zalecenia producenta oraz badania własne. Rejestrację sygnałów dokonano mocując czujniki drgań typu akcelerometrycznego B&K 4383 na kołnierzu sprężarki niskiego ciśnienia prostopadłe do osi wirowania – rys. 3.



Rys. 2. Schemat przyjętego procesu decyzyjnego



Rys. 3. Miejsce montażu przetworników drgań na silnikach DR 76 i DR 77

Przyjęta metodyka badań zakłada przeprowadzenie pomiarów wartości skutecznej prędkości drgań (Y_{rms}) oraz analizy harmonicznej, w wyniku której określa się wartości sygnałów podstawowych od prędkości SNC (sprężarki niskiego ciśnienia), SWC (sprężarki wysokiego ciśnienia). W trakcie badań realizowanych według własnej metodyki dokonano analizy bezwymiarowych współczynników niewyważenia wirników tj:

- S 1 – czyli stosunku wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej II harmonicznej częstotliwości wymuszeń odpowiedniego wirnika;
- S 2 - czyli stosunku wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej III harmonicznej częstotliwości wymuszeń odpowiedniego

Minimalne wartości parametrów S1 i S2 przy obciążeniach nominalnych wynoszą odpowiednio:

- dla silników DR 76 i DR 77:

$$S1_{SNC} = \min 1,0$$

$$S2_{SNC} = \min 1,5$$

$$S1_{SWC} = \min 1,0$$

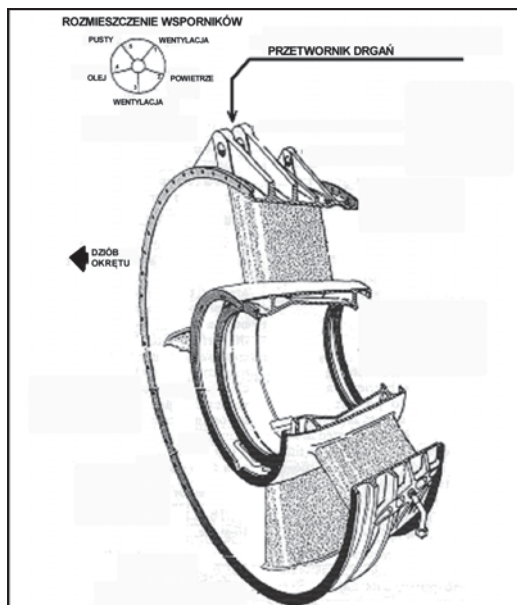
$$S2_{SWC} = \min 1,5$$

gdzie: SNC – sprężarka niskiego ciśnienia, SWC – sprężarka wysokiego ciśnienia.

3. REALIZACJA POMIARÓW

Na silnikach LM 2500 badania wykonuje się w pobliżu punktów pomiarowych, które przyjął w procedurze monitoringu producent. Istotą wyboru miejsca montażu przetwornika było wyeliminowanie zakłóceń sygnałów. W przypadku łożysk nośnych wirników należało kierować się wyborem takiego wspornika oprawy łożyska, który wewnątrz nie posiada kanałów innych mediów. Jedynym takim elementem jest wspornik nr 5 („PUSTY”) - rysunek

4. Uchwyt akcelerometru dla potrzeb badań własnych został zamontowany nad tym elementem.



Rys. 4. Miejsce montażu czujnika drgań

Na podstawie analizy przydatności parametrów drganiowych, dla relacji „defekt - symptom”, jako sygnały użyteczne dla silników LM 2500 wytypowano wartość pierwszej harmonicznej amplitudy prędkości drgań związanej ze sprężarką wytwornicy spalin - Y_{GG} [mm/s], turbiny napędowej - Y_{PT} [mm/s] oraz wartości skuteczne amplitud przyspieszeń drgań Y_{X-st} [mm/s²] charakterystyczne dla częstotliwości poszczególnych stopni wirników.

W celu opracowania jednolitych procedur oceny niewyważenia wirników silników turbinowych o różnym stopniu zużycia eksploatacyjnego przyjęto koncepcję znalezienia bezwymiarowych parametrów charakteryzujących ten stan. Biorąc pod uwagę analizę teoretyczną wymuszeń oraz wyniki badań nadzoru diagnostycznego, jako najbardziej wrażliwe symptomy stanu wytypowano [3]: S 1 – stosunek wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej II harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego wirnika i S 2 - stosunek wartości uśrednionej amplitudy prędkości drgań odpowiedniego wirnika (I harmoniczna) do składowej odpowiadającej III harmonicznej częstości wymuszeń odpowiedniego wirnika.

Dla potrzeb organizacyjnych parametry drganiowe podzielono na 3 grupy –Tabela 1.

W przypadku silników DR 76 i DR 77 idea miejsca montażu pozostała ta sama przy uwzględnieniu odmienności konstrukcji Przetworniki drgań zamontowano wykorzystując uchwyty stalowe własnej konstrukcji umieszczone nad przednim łożyskiem nośnym wirnika sprężarki niskiego ciśnienia. Uchwyty zostały wykonane tak, aby częstotliwość rezonansowa w osi pomiarowej nie nakładała się na podstawowe harmoniczne związane

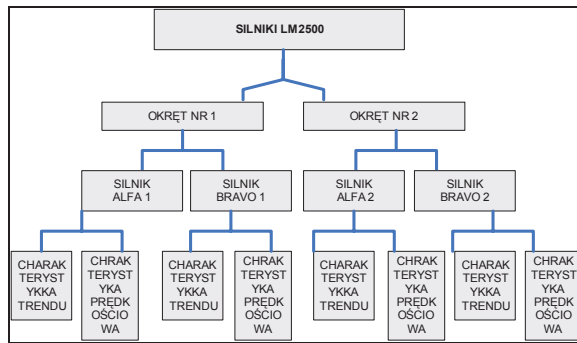
z prędkościami obu wirników. Kierunek pomiaru określono jako prostopadły do osi wirowania. Wyboru kierunku montażu akcelerometrów dokonano uwzględniając analizę teoretyczną wymuszeń wynikających z wirowania niewyważonego wału oraz w oparciu o dokonane wcześniej badania wstępne na innych obiektach [3, 4]. Identyfikacja niewyważenia wirników silników DR 76 i DR 77 jest realizowana przy jednoczesnym spełnieniu wymogów producenta oraz analizy bezwymiarowych symptomów niewyważenia S1 i S2.

Tab.1. Podział grup symptomów dla silników LM 2500

Grupa	Parametry drganiowe
1	I harmoniczna GG/GG [mm/s], I harmoniczna GG/PT [mm/s], I harmoniczna PT/GG [mm/s], I harmoniczna PT/PT [mm/s],
2	S1 GG [-], S2 GG [-], S1 PT [-], S2 PT [-]
3	wartości skuteczne amplitudy przyspieszeń drgań częstotliwości charakterystycznych dla poszczególnych stopni wirnikowych wytwornicy spalin.

4. ANALIZA TRENDU SYMPTOMÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Analiza dokumentacji eksploatacyjnej sprzed przejścia do Polskiej Marynarki Wojennej silników LM 2500 pozwoliła na wykorzystanie wcześniejszych wyników badań dla procesu diagnozowania. W trakcie realizowanych badań własnych dokonano uproszczenia polegającego na przyporządkowaniu stanu technicznego silnika po remoncie (a właściwie wartości jego symptomów) do silnika fabrycznie nowego. Tego typu uproszczenia dokonano ze względu na niewielką liczbę badanych obiektów. W celu skrócenia czasu podejmowania decyzji oraz uruchomienia aktywnej bazy danych rozpatrywanych parametrów drganiowych przygotowano oprogramowanie ANALIZA, którego zadaniem jest archiwizacja i przetwarzanie danych pomiarowych dla potrzeb identyfikacji stanu technicznego układów wirnikowych badanych silników. Organizacja przesyłu danych została przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5. Organizacja danych w programie ANALIZA

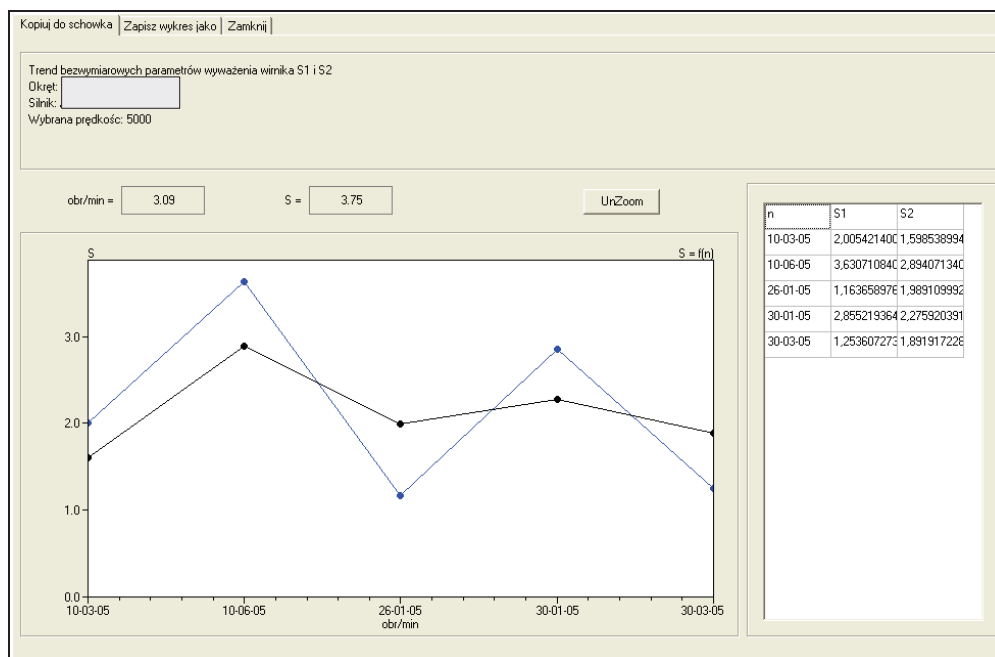
Przygotowany program przetwarza pliki rejestrowane przez system w formie widmowej do poziomu macierzy kolumnowej, w której I kolumna oznacza wartość środkową częstotliwości, II i następnne kolumny wartości rozpatrywanego symptomu drganiowego (wartość skuteczna amplitudy prędkości lub przyspieszeń drgań w zależności od grupy symptomu). Każdy z plików ma specyficzną i rozpoznawalną przez program nazwę, która zawiera informację o okręcie, silniku oraz obciążeniu, przy którym dokonano rejestracji drgań. Pozostałe informacje dotyczące sposobu rejestracji są zawarte w nagłówku pliku i rozpoznawalne w procesie obróbki danych. Analizowane widma są rozpatrywane dla dwóch częstotliwości próbkowania $f_1 = 800$ Hz – dla oceny

niewyważenia wirników oraz parametrów S_1 , S_2 i $f_2 = 12800$ Hz – dla oceny częstotliwości łopatkowych poszczególnych stopni wirnikowych. Ocena trendu zmian badanych parametrów silników LM 2500 wszystkich grup rozpatrywanych symptomów odbywa się jako funkcja czasu eksploatacji przy zmiennej, jaką jest data pomiaru – rys. 6.

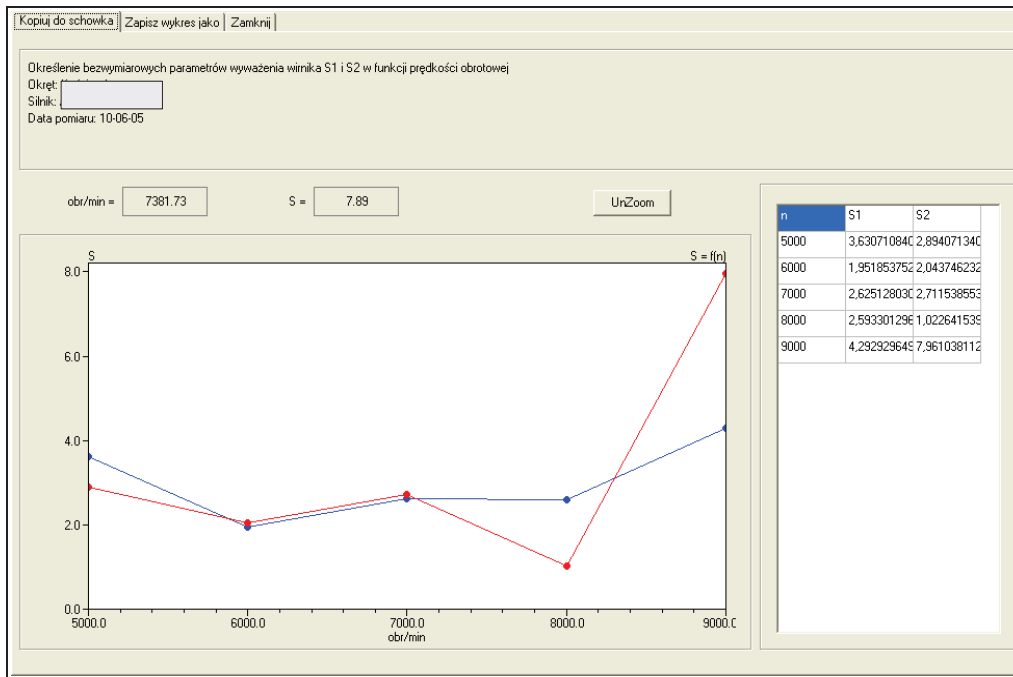
Druga procedura diagnostyczna sprowadza się do wykonania charakterystyki prędkościowej rozpatrywanych parametrów – relacji „parametr drganiowy – prędkość obrotowa wirnika wytwornicy spalin”. Badania przeprowadza się w stanach ustalonych dla prędkości obrotowych wirnika wytwornicy spalin wynoszących $n_{GG} = 5000, 6000, 7000, 8000$ i 9000 obr/min – rys. 7.

Powstałe charakterystyki prędkościowe wszystkich parametrów drganiowych archiwizuje się w postaci 3 D – wymiarowych wykresów gdzie zmiennymi są parametr drganiowy, prędkość obrotowa wytwornicy spalin oraz czas pracy silnika pomiędzy kolejnymi pomiarami.

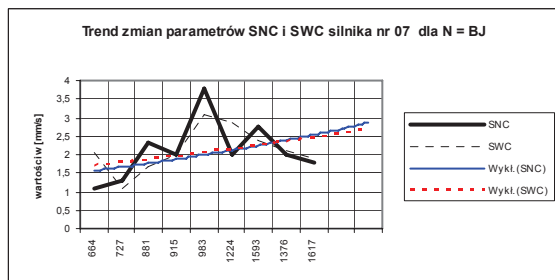
Identyfikacja niewyważenia wirników niskiego i wysokiego ciśnienia w silnikach DR 76 i DR 77 odbywa się w sposób podobny. Symptomy określone przez producenta analizuje się pod względem nie tylko czasu eksploatacji ale również pod względem aktualnego obciążenia silnika – rys. 8.



Rys. 6. Analiza trendu symptomów S1 i S2 dla wytwornicy spalin

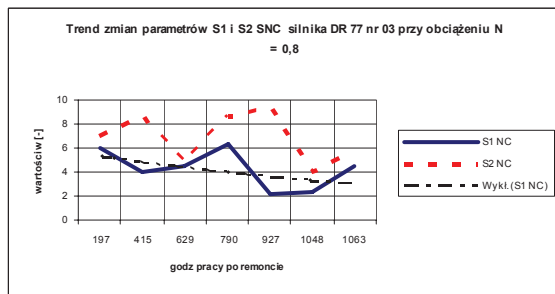


Rys. 7. Charakterystyka prędkościowa parametrów S1 i S2



Rys. 8. Analiza trendu parametrów Y_{SNC} i Y_{SWC} silnika DR 76

Również analiza bezwymiarowych symptomów niewyważenia jest realizowana jako funkcja czasu eksploatacji dla każdego z obciążeń eksploatacyjnych – rys. 9.



Rys. 9. Analiza bezwymiarowych symptomów niewyważenia dla przykładowego silnika DR 77

5. WNIOSKI

Analiza parametrów rejestrowanych przez okrętowy system monitoringu dla silników LM 2500 nie wykazała zależności umożliwiających jednoznaczne przypisanie zmian wartości któregośkolwiek z parametrów z czasem eksploatacji [6]. Zastosowanie opracowanej w AMW metody analizy wykazało wrażliwość wytypowanych symptomów na procesy zużycia, w tym powstałego niewyważenia, co pozwoliło na bardziej racjonalne gospodarowanie czasem użytkowania silników w okresach przedremontowych. Realizacja badań w cyklu półrocznym dostarczyła danych dla realizacji docelowo nowego systemu monitoringu, którego funkcjonowanie może znacznie podwyższyć niezawodność układu napędowego okrętów.

Wdrożony drganiowy system analizy niewyważenia wirników na korwetach 1241 RE zaowocował bezawaryjną pracą całej populacji silników od roku 1989. Wszystkie niesprawności układów wirnikowych zostały znacznie wcześniej zidentyfikowane uniemożliwiając powstanie uszkodzeń katastroficznych.

Analiza wyników pozwoliła na przedstawienie następujących wniosków szczegółowych:

1. proponowana koncepcja diagnozowania metodą drganiową umożliwia szybkie uzyskanie oceny stanu technicznego wirników.
2. wdrożenie koncepcji oceny stanu technicznego okrętowych turbinowych silników spalinowych w oparciu o analizę trendu wybranych parametrów wibroakustycznych pozwala na wysoce prawdopodobne i wczesne wykrycie niewyważenia wirników oraz stworzenie

wiarygodnej bazy danych dla systemu diagnozowania *on-line*.

3. badania trendu rozpatrywanych parametrów pozwalają opracowanie relacji prognozujących zmiany stanu technicznego, co jest szczególnie istotne w przypadku silników o zaawansowanym zużyciu.

6. LITERATURA

- [1] Downham E., Woods R.: *The rationale of monitoring vibration on rotating machinery*, ASME Vibration Conference, Paper 71- Vib-96, September 1971.
- [2] Charchalis A., Pojawa B.: *Wpływ pogorszenia się stanu technicznego okrętowego turbinowego silnika spalinowego na jego charakterystyki*

rozruchowe. XXVII DIAGNOSTYKA MASZYN 2000.

- [3] Grządziela A., Charchalis A.: *Diagnosing of naval gas turbine rotors with the use of vibroacoustic parameters*. International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADEM 2001, Manchester, UK, pp 495 – 502.
- [4] Grządziela A., Charchalis A.: *Diagnosing of naval gas turbine rotors with the use of vibroacoustic parameters*. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. The Hague, The Netherlands 2001, pp. 268.
- [5] Orłowski Z.: *Diagnostyka w życiu turbin parowych*. WNT. Warszawa 2001. ISBN 83-204-2642-1.



Dr inż. **Andrzej GRZĄDZIELA** jest Kierownikiem Zakładu Napędów Okrętowych w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Wydziału Mechaniczno – Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. W swojej działalności zawodowej zajmuje się problemami oceny niewyważenia i oceny współosiowości w okrętowych układach napędowych a także projektowaniem okrętów i doбором układów napędowych. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych.