

## OKREŚLENIE RELACJI DIAGNOSTYCZNYCH W UKŁADZIE TURBODOŁADOWANIA ŚREDNIOOBROTOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Andrzej ADAMKIEWICZ, Gustaw MICHAŁEC

Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno – Elektryczny,  
81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69; e-mail: [aadam@amw.gdynia.pl](mailto:aadam@amw.gdynia.pl)

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano obiekt badań wykorzystany w eksperymencie diagnostycznym oraz metodykę jego przeprowadzenia, pozwalającą określać relacje diagnostyczne w układzie turbodoładowania. Pokazano niektóre z otrzymanych wyników badań, umożliwiające identyfikację relacji wśród rejestrowanych parametrów ciepło – przepływowych i drganiowych układu turbodoładowania, przeprowadzając ich ogólną systematyzację.

### DETERMINING THE DIAGNOSTIC RELATIONS FOR MEDIUM - ROTATIONAL TURBOCHARGED COMBUSTION ENGINE

#### Abstract

In paper an investigation object in diagnostic experiment, as well as methodology of his execution, permitting to define diagnostic reports in arrangement of diesel engine turbocharger system was presented. It was show too, some received results of investigations, which enabled identification of report among registered thermal - flowery and vibration parameters, arrangement of diesel engine turbocharger system, carry out theirs general systematization.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik spalinowy, symptom, układ turbodoładowania, turbosprężarka.

### 1. Wprowadzenie

Każdy stan układu turbodoładowania silnika okrętowego może być wyrażony przez zbiór wartości liczbowych charakteryzujących jego strukturę oraz intensywność procesów zachodzących w czasie funkcjonowania silnika. Jest to więc nic innego, jak zbiór wartości liczbowych zmiennych, w danym momencie jego czasu życia opisujących badany silnik.

Mogą być one określane bezpośrednio na podstawie badań poszczególnych elementów silnika lub ich współdziałania. Jednak często jest to niemożliwe bez ingerencji w strukturę konstrukcyjną silnika. Innym wariantem oceny stanu technicznego silnika może być wykorzystanie tzw. systemów ekspertowych bazujących na zebranej wcześniej, odpowiednio opracowanej, sformalizowanej wiedzy i opinii ekspertów. Pozyskanie jednak takich informacji jest tylko pozornie proste.

Najczęściej stosowane metody pośrednie oceny stanu silnika polegają na obserwacji sygnałów i procesów związanych z ich działaniem. Wówczas sygnałem diagnostycznym jest nośnik materialny, najczęściej przebieg (cecha, miara) wielkości fizycznej umożliwiający wnioskowanie diagnostyczne. Pełnym opisem wnioskowania diagnostycznego są zbiory cech w postaci liczb i funkcji, ukazujące prawdopodobne stany i możliwości dalszej eksploatacji silnika. W praktyce każdy opis stanu silnika jest ograniczony dostępnością parametryczną i jest modelem budowanym na podstawie przyjętych założeń i rozpoznanych wcześniej relacji. Modelowy opis silnika powinien być na tyle adekwatny, by odzwierciedlał zmiany stanu silnika i wystarczająco wyróżniał zmiany zachodzące w rzeczywistym obiekcie. Artykuł prezentuje możliwości pozyskiwania relacji diagnostycznych w oparciu o przeprowadzony eksperyment diagnostyczny.

### 2. Obiekt badań

W charakterze obiektu badań wybrany został układ turbodoładowania okrętowego silnika średnioobrotowego typu Sulzer 6AL 20/24 [1,2]. Jego wybór został podyktowany następującymi względami:

- liczebnością tego typu układów stosowanych w silnikach napędu głównego w okrętownictwie,
- racjonalnością i dostępnością pomiarową procesu eksploatacyjnego.

Silnik okrętowy typu 6AL 20/24 zainstalowany w laboratorium AMW jest czterosuwowym, doładowanym, rzędowym, wysokoprężnym silnikiem spalinowym, z bezpośrednim wtryskiem paliwa, chłodzonym wodą, z odbiornikiem energii przez hamulec wodny typu Frouda. Podstawowe dane techniczne silnika przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1 Dane techniczne silnika SULZER 6AL 20/24

Lp	Nazwa	Oznaczenia	Jednostka miary	Wartość
1	Liczba cylindrów	z	-	6
2	Średnica cylindra	D	mm	200
3	Skok tłoka	S	mm	240
4	Stopień sprężania	$\epsilon$	-	12,7
5	Nominalna prędkość obrotowa	$n_n$	$\text{min}^{-1}$	750
6	Średnia prędkość tłoka	$c_{sr}$	m/s	6,0
7	Moc nominalna	$N_n$	kW	420
8	Średnie ciśnienie użyteczne	$p_e$	MPa	1,5
9	Ciśnienie wtrysku paliwa	$p_{wtr}$	MPa	25
10	Największe ciśnienie spalania	$p_{max}$	MPa	11,0
11	Kolejność zapłonów	-	-	1-4-2-6-3-5
12	Ciśnienie doładowania	$p_d$	MPa	0,195
13	Współczynnik nadmiaru powietrza	$\lambda$	-	2,2

**Turbosprężarka NAPIER C- 045**

Silnik jest wyposażony w turbosprężarkę typu Napier C-045 wyprodukowaną przez WSK Rzeszów. Turbosprężarka ta składa się z trzyczęściowego kadłuba, w którym umieszczono zespół wirnikowy, składający się z: jednostopniowej turbiny promieniowej i sprężarki osiowej, osadzonych w łożyskach ślizgowych. Łapa montażowa turbosprężarki stanowi jedną całość z jej kadłubem środkowym. W tab. 2 przedstawiono podstawowe dane techniczne turbosprężarki i układu doładowania silnika.

Tabela 2 Dane techniczne turbosprężarki

Lp	Nazwa	Oznaczenia	Jednostka miary	Wartość
1	Liczba łopatek sprężarki	$z_s$	-	15
2	Liczba łopatek turbiny	$z_T$	-	13
3	Masa turbosprężarki	$G_{TS}$	kg	75
3	Masa zespołu wirnikowego	$G_w$	kg	12
4	Spręż	$//$	-	2.8
5	Maksymalna prędkość obrotowa	$n_{TS}$	$\text{min}^{-1}$	41000
6	Strumień masy powietrza	$\dot{m}_{pow}$	$\text{m}^3/\text{h}$	31 – 76
7	Wymiary sprężarki	$D_1, D_2, b_1$	mm	218-123-14,5
8	Wymiary turbiny	$D_1, D_2, b_1$	mm	181-122-32,5

**3. Metodyka badań**

Wobec niepełnej informacji o stanie projektowym układu turbodoładowania: silnik Sulzer 6AL 20/24 – turbosprężarka Napier C-045, jako stanu porównawczego, obserwacje ograniczono do poszukiwania relacji dla stanów układu oznaczanych jako  $I, I_S, k, k+I$  oraz początkowego dostępnego pomiarowo:

- stan początkowy  $0$  – badano pełny zakres obciążenia silnika bez symulacji zakłóceń zewnętrznych,
- stan  $I$  - badano pełny zakres obciążenia silnika bez symulacji zakłóceń zewnętrznych;
- stan  $I_S$  - badano pełny zakres obciążenia silnika z symulacją zakłóceń zewnętrznych; generowano drgania i zakłócenia aerodynamiczne poprzez symulację zanieczyszczenia filtra powietrza i dławienie na wylocie spalin;
- stan  $k$  – badano pełny zakres obciążeń silnika po upływie pewnego czasu kalendarzowego;
- stan  $k+I$ - badano pełny zakres obciążenia silnika po upływie kolejnego etapu eksploatacji i zaistnienia niezamierzonego zdarzenia eksploatacyjnego.

Dla określenia relacji diagnostycznych w układzie turbodoładowania założono, że zbiory cech diagnostycznych i funkcjonalnych są znane, za wyjątkiem zbiorów cech konstrukcyjnych [ 3 ]. Zależność wiążąca ze sobą cechy funkcjonalne traktowane jako parametry uogólnione z cechami diagnostycznymi, tworzy relacje diagnostyczne wykorzystywane do oceny globalnego stanu zdatości układu turbodoładowania, jako zbiór wybranych par cech funkcjonalnych  $f$  i symptomów  $s$

$$\mathfrak{R}_G = \{(f, s) : f \in F, s \in S\} \quad (1)$$

Relację tą zapisano formalnie jako podzbiór w iloczynie kartezyjskim zbiorów  $F$  i  $D$

$$\mathfrak{R}_G(F, S) \subset F \times S \quad (2)$$

Do poszukiwania niesprawności w podukładach i maszynach były wykorzystywane relacje typu cecha diagnostyczna – symptom stanu [ 7 ]

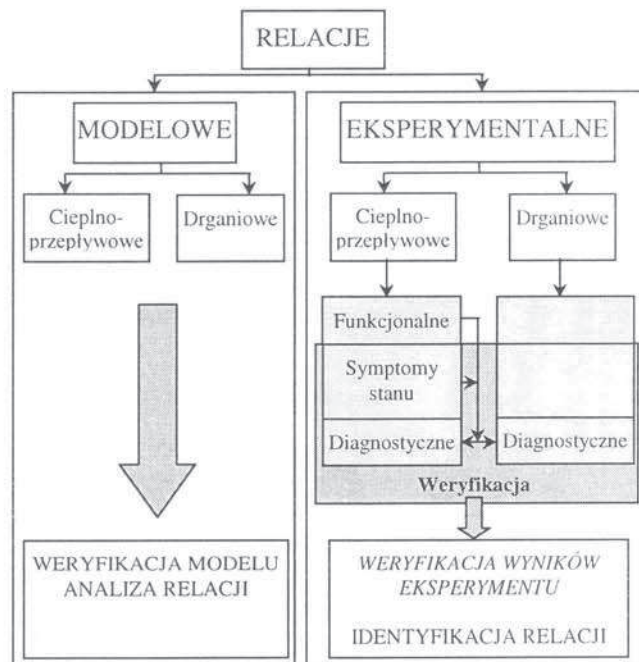
$$\mathfrak{R}_{TM} = \{(d_M, s_M) : d_M \in D_M, s_M \in S_M\} \quad (3)$$

i analogicznie mogą być one zapisane w postaci

$$\mathfrak{R}_{TM}(D_M, S_M) \subset D_M \times S_M \quad (4)$$

jako podzbiory w zbiorze wszystkich par  $(d_M, s_M)$ .

Na rys. 1 przedstawiono klasyfikację cech i ich wzajemne relacje w zadaniu diagnostycznym.



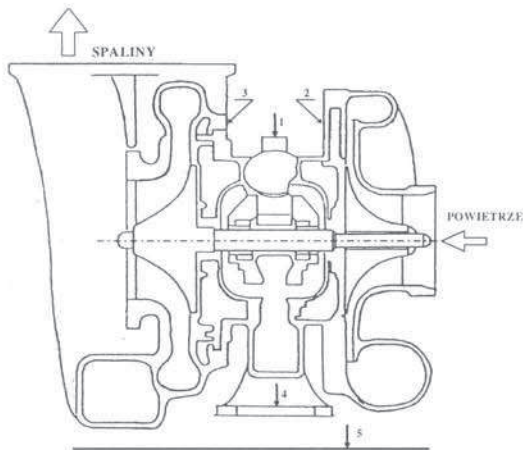
Rys. 1. Schemat systematyzacji cech do poszukiwania relacji diagnostycznych

W charakterze cech diagnostycznych i symptomów stanu wykorzystano parametry ciepło – przepływowe [2] oraz drganiowe [4,6]. Na rys. 2 przedstawiono usytuowanie punktów pomiarowych parametrów drganiowych na schemacie turbosprężarki [4].

KONFIGURACJA	ARGUMENT r
A	1+2
B	1+3
C	2+3
D	1+4
E	1+5

Eksperyment przeprowadzono w czterech sekwencjach czasowych użytkowania silnika. Pomiary parametrów drganiowych turbosprężarki wykonywano równocześnie w dwóch punktach, dla konfiguracji A ... E położeń r punktów pomiarowych.

Ocena składowych drgań wirujących mas, pochodzących od ruchu obrotowego, dokonywana była na podstawie analizy synchronicznej [4.5].



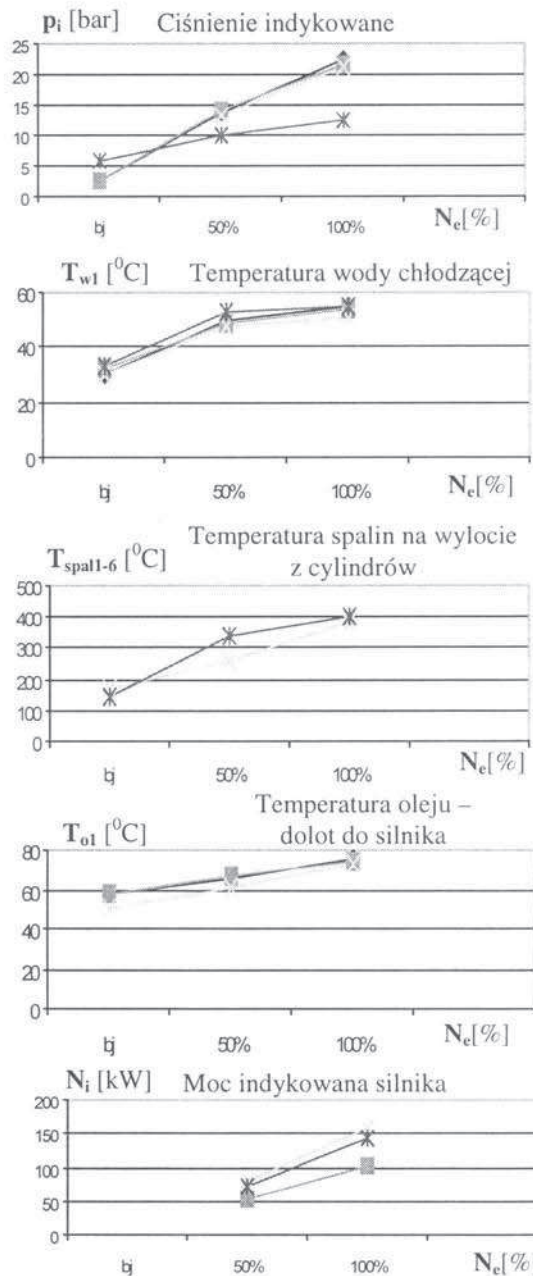
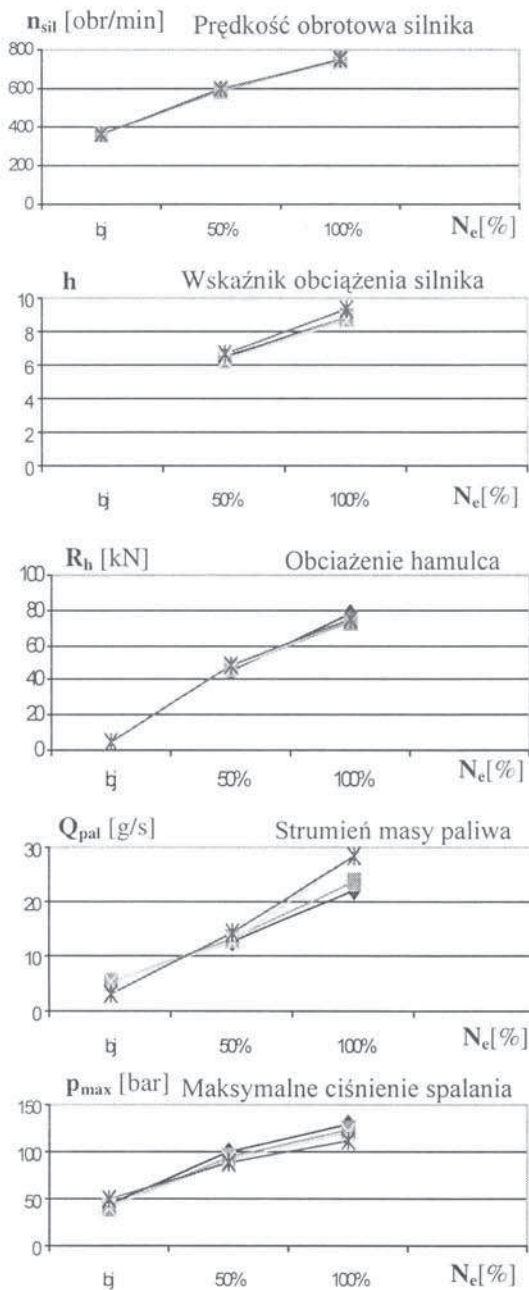
Rys. 2. Schemat turbosprężarki z naniesionymi punktami pomiarowymi przetworników drganiowych 1 - kadłub środkowy; 2 - kadłub sprężarki; 3 - kadłub turbiny; 4 - łapa fundamentowa; 5 - kadłub silnika

#### 4. Wyniki badań

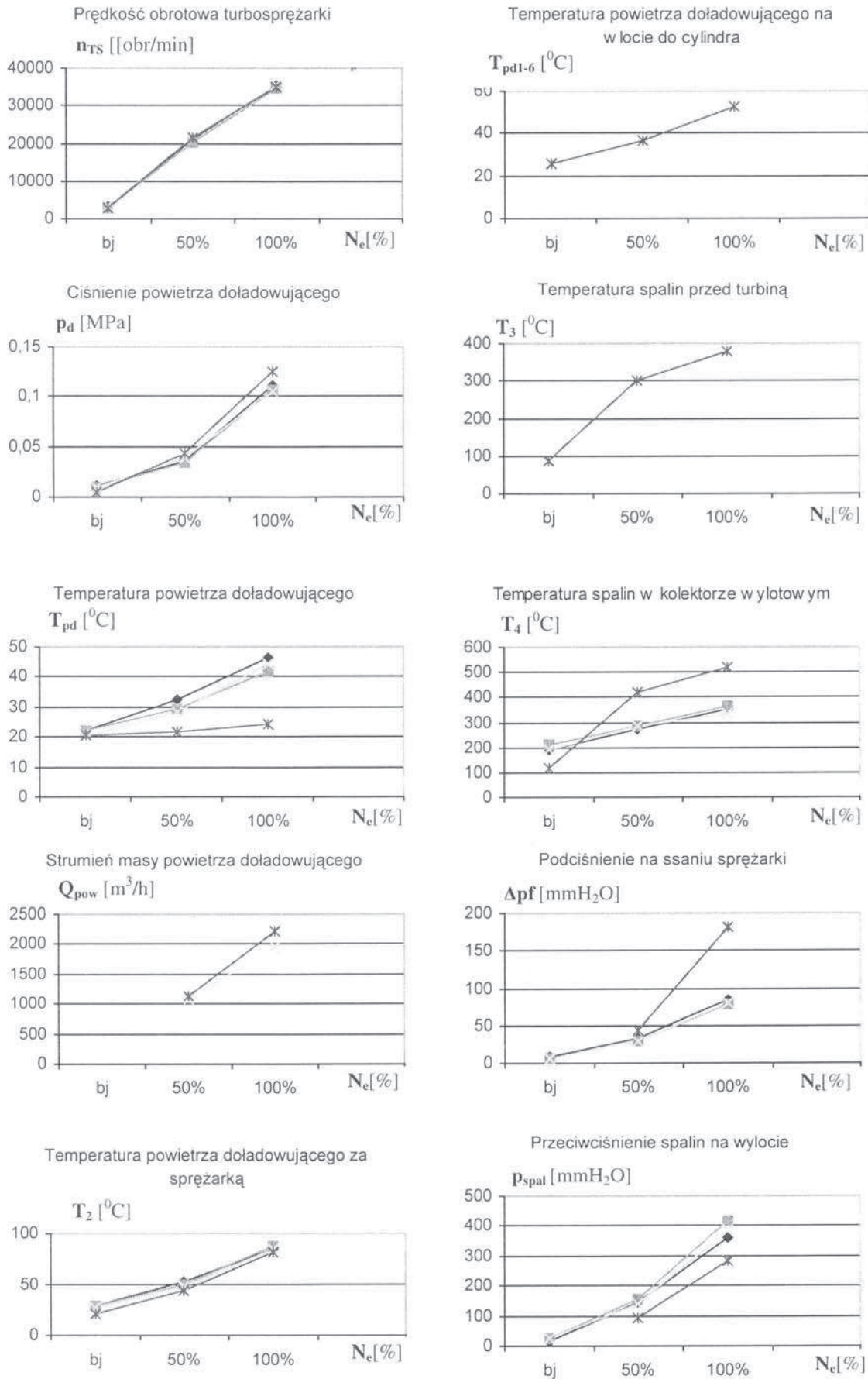
Poszukiwanie relacji diagnostycznych przeprowadzono zgodnie z siecią relacji w zadaniu diagnostycznym [7]. Otrzymane wyniki pomiarów ciepłno przepływowych zestawiono w tabelach, co umożliwiło następnie ich przedstawienie graficzne. Dla jednego z wariantów mocowania czujników, tutaj 1-2, na rys. 3a i 3b pokazano ich zmiany, odpowiednio dla silnika i turbosprężarki, na których oznaczono:



Na rys. 4 pokazano parametry drganiowe dla jednego z zakresów pracy silnika (biegu jałowego), które odpowiadają określonym parametrom ciepłno-przepływowym, tworząc relacje diagnostyczne w układzie.



Rys. 3a. Parametry silnika

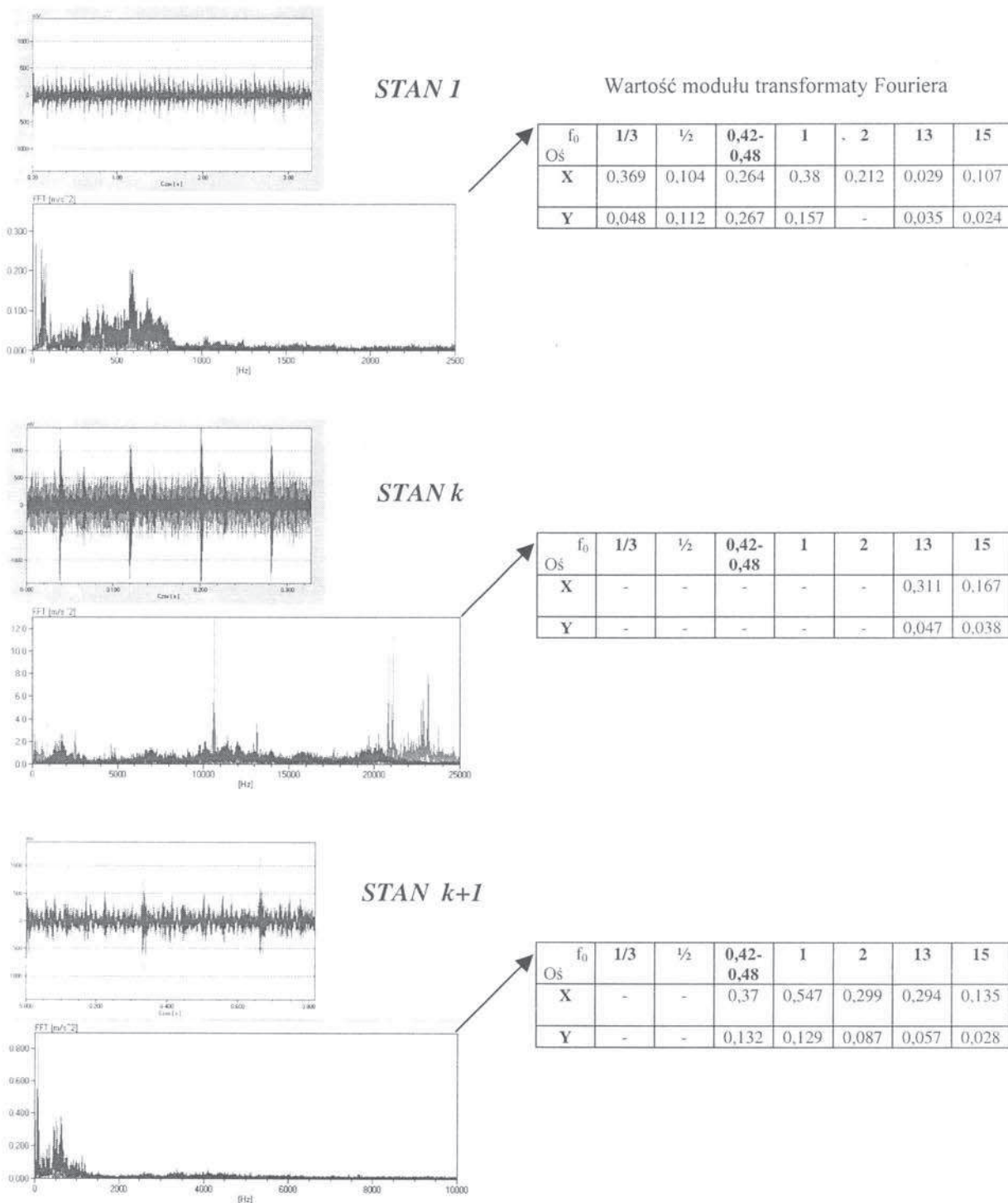


Rys.3b. Parametry turbosprężarki

Przedstawione wyniki pomiarów na biegu jałowym silnika ujawniły zmiany wartości takich parametrów jak:

- strumień masy paliwa (dawka paliwa),
- średnie ciśnienie indykowane,
- temperatura spalin na wylocie,
- temperatura oleju na dolocie do silnika,

- temperatura powietrza doładowującego,
- temperatura spalin w kolektorze wylotowym,
- zmiana wartości modułu transformaty Fouriera,
- subharmoniczne występujące na biegu jałowym i na zakresie obciążenia 50%.



Rys. 4. Wyniki badań zmian parametrów drganiowych łożysk i zespołu wirnikowego turbosprężarki

## 5. Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki pomiarów parametrów cieplno – przepływowych i drganiowych wykazały występujące różnice wartości pomiędzy poszczególnymi seriami pomiarowymi. Są one podstawą do budowy relacji diagnostycznych w różnych konfiguracjach, w zależności od podatności diagnostycznej silnika, jak i posiadanych narzędzi pomiarowych. Ilość nagromadzonego materiału eksperymentalnego w poszczególnych seriach pomiarowych na różnych zakresach obciążeń silnika i wariantach usytuowania czujników drganiowych wymaga celowanego poszukiwania relacji diagnostycznych, pod kątem określonej niesprawności. Zakładając mały poziom zakłóceń, można zastosować symptomowe modele relacji diagnostycznych typu regresyjnego, z addytywnymi zakłóceniami, poszukując relacji w układach:

- symptomy niesprawności - cechy stanu,
  - cechy stanu - symptomy niesprawności,
  - zbiór symptomów niesprawności - cecha eksploatacyjna stanu silnika, np. czas kalendarzowy, wykorzystany zasób pracy, itp.
- Wymagają one jednak nagromadzenia odpowiednio dużego zbioru doświadczeń.

## Literatura

1. ADAMKIEWICZ A., MICHAŁEC G.: *General Diagnostic Model of a Marine Diesel Engine Turbocharger*. Marine Technology Transaction Vol. 11, 2000 p.25-40.
2. ADAMKIEWICZ A., MICHAŁEC G.: *Identyfikacja relacji diagnostycznych w turbodoładowarce okrętowego silnika spalinowego*. Materiały konferencji DIAGNOSTYKA'99, ATR Bydgoszcz – Borówno, czerwiec 1999, t. I, str.7 – 18.
3. MICHAŁEC G., ADAMKIEWICZ A., WITKOWSKI K.: *Model Diagnostic Relations in a Marine Diesel Turbocharger System*, II Internationally Scientifically - Technical Conference EXPLO – DIESEL & GAS TURBINE '01, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga, April 23-27, 2001. Vol. 1, pp. 197 - 208.
4. ADAMKIEWICZ A., MICHAŁEC G.: *Ocena stanu dynamicznego turbodoładowarki okrętowego silnika spalinowego*, Problemy Eksploatacji - Zeszyty Naukowe Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1999, Nr 2/99, str. 9 - 20.

5. Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT, Warszawa 1989.
6. ADAMKIEWICZ A., ŁUTOWICZ M.: *An attempt to evaluate the technical condition of a ship auxiliary driving unit with a gas turbine on the basis of vibrations*, Marine Technology Transactions, Polish Academy of Science, Branch in Gdańsk 2000, Vol. 11, pp. 3-24.
7. ADAMKIEWICZ A.: *Relacje diagnostyczne w okrętowych turbinowych silnikach spalinowych*, Problemy Eksploatacji, 3/2001, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom, str. 9-20.



**Andrzej Adamkiewicz** - absolwent Wydziału Technicznego WSMW w Gdyni z 1971 oraz Akademii Marynarki Wojennej w St. Petersburgu na kierunku okrętowe napędy paro i gazo - turbinowe. Wieloletni mechanik na

okręcie szkolnym, a następnie nauczyciel akademicki Wydziału Mechaniczno – Elektrycznego AMW, aktualnie adiunkt – prodziekan ds. dyd. WME AMW. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w IMP PAN w Gdańsku. Zainteresowania naukowe i dydaktyczne: okrętowe turbinowe silniki spalinowe i problemy ich eksploatacji. Ostatnie prace dotyczą przydatności diagnostycznej parametrów pracy tych silników oraz diagnostyki układu turbodoładowania okrętowych silników spalinowych.



**Gustaw Michalec** - absolwent Akademii Marynarki Wojennej z roku 1990, oficer mechanik eksploatujący siłownię okrętów wojennych z tłokowymi silnikami spalinowymi w latach 1990 - 1998, następnie asystent w Instytucie Technicznej Eksploatacji Okrętu zajmujący się diagnostyką układów turbodoładowania silników spalinowych. Pracę dydaktyczną stanowiły wykłady i ćwiczenia z Eksploatacji Mechanicznych Urządzeń Okrętowych. Aktualnie pracuje nad rozprawą doktorską.