ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Artur Bejger, Tomasz Burnos

Możliwość wykorzystania analizy czasowo-częstotliwościowej dla wybranych sygnałów emisji akustycznej

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, analiza czasowo-częstotliwościowa, silnik wysokoprężny, przekładnia zębata

W artykule podjęto próbę zastosowania niektórych metod analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów emisji akustycznej. Wzięto pod uwagę pomiary dotyczące wybranych maszyn i urządzeń pracujących w siłowni okrętowej. Wykorzystano sygnały emisji akustycznej pochodzące od układu wtryskowego silnika okrętowego oraz od łożysk tocznych i przekładni zębatej. Dokonano wstępnej selekcji sygnałów pod względem ich przydatności dla celów diagnostycznych.

The Possibilities of Using Time-Frequency Analysis for Some Acoustic Emission Signals

Key words: acoustic emission, time frequency analysis, diesel engine, gear box

In the article an attempt was made to use some time-frequency methods for the analysis of acoustic emission signals. Concerning the field of interests measurements were taken of some ship machinery and equipment. Signals coming from the fuel injection systems of ship diesel engines, roll bearings and gear were analyzed. They were pre-selected in regard to their usefulness for diagnostic purposes.

Wstęp

Dokonując systematycznie, w określonych odstępach czasowych, pomiarów stanu technicznego urządzenia można w znacznym stopniu skrócić (lub zupełnie wyeliminować) czas nieprzewidzianego postoju czy awarii. Względy ekonomiczne współczesnych jednostek pływających, jak również warunki bezpieczeństwa sprawiają, że wszystkie urządzenia znajdujące się na statku (w szczególności w siłowni okrętowej oraz niektóre urządzenia pokładowe) powinny być zaopatrzone w coraz sprawniejsze urządzenia monitorujące ich stan techniczny. Powyższe można osiągnąć również za pomocą diagnostyki technicznej. Dokonanie pomiarów diagnostycznych w warunkach eksploatacyjnych (w warunkach rzeczywistej pracy urządzenia) jest niejednokrotnie niemożliwe. Ze względu na stosunkowo niskie pasma badanych częstotliwości drgań, w większości przypadków diagnostyka drganiowa może byś stosowana w bardzo ograniczonym zakresie (głównie podczas „postoju" statku).

Podstawowym problemem podczas diagnozowania metodami drganiowymi są nakładające się sygnały pochodzące od innych urządzeń (np. śruby napędowej itp.). Jest to szczególnie odczuwalne w przypadku, gdy obiekt diagnozowany znajduje się w siłowni okrętowej, gdzie na stosunkowo niewielkiej powierzchni skomasowanych jest szereg urządzeń emitujących drgania.

1. Wybrane metody analizy czasowo-częstotliwościowej

W zastosowaniach diagnostycznych najbardziej rozpowszechnioną metodą analizy sygnałów jest analiza częstotliwościowa oparta na transformacie Fouriera. Nie daje ona jednak możliwości zlokalizowania krótkotrwałych zmian w sygnale tzn. zlokalizowania sygnałów pochodzących od procesów przejściowych. Wprowadzając do transformaty Fouriera okno lokalizacyjne definiowane jako $w(t-b)$, gdzie b określa przesunięcie (lokalizację) okna w czasie, zdefiniowano krótkoczasową transformatę Fouriera:

$$S(b, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot w(t-b)\mathrm{d}t \tag{1}$$

która jest uogólnioną postacią transformaty Gabora. Wprowadzenie okna lokalizacyjnego w dużej mierze poprawiło jakość uzyskiwanych rezultatów przy lokalizowaniu sygnałów przejściowych w odniesieniu do tradycyjnej transformaty Fouriera. Głównym ograniczeniem krótkoczasowej transformaty Fouriera jest jednak stała szerokość okna, utrudnia to analizę sygnałów zawierających

składowe znacznie różniące się częstotliwością. Kolejnym krokiem w rozwoju metod analizy sygnału było rozszerzenie własności okna lokalizacyjnego o parametr skalujący a, zdefiniowano funkcję analizującą jako: $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$. Funkcja $\psi(t)$ może być w zasadzie dowolną funkcją opisaną w przedziale, w którym przyjmuje ona wartości różne od zera. Umożliwia to dobór funkcji analizującej w taki sposób, aby najlepiej odwzorowywała poszukiwany proces przejściowy. W oparciu o wyżej wymienioną funkcję nazywaną funkcją (falką) macierzystą, bazową lub główną zdefiniowano funkcję dwuwymiarową określaną mianem transformaty falkowej [1]:

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}t, \quad a,b \in R, a \neq 0 \tag{2}$$

gdzie:

- $x(t)$ – analizowany sygnał,
- a – parametr określający częstotliwość (skalę),
- b – parametr określający czas (przesunięcie).

Przez zmianę parametru a uzyskuje się zmianę czasu trwania falki, czyli zmianę jej częstotliwości, natomiast przez zmianę parametru b możemy zmieniać jej położenie w dziedzinie czasu. Wykorzystując zmienność tych parametrów możemy optymalizować je pod kątem żądanej rozdzielczości w dziedzinie czasu i częstotliwości. W ostatnich latach, wraz z rozwojem techniki mikroprocesorów, a głównie ich mocy obliczeniowej, wzrosło zainteresowanie tą metodą analizy sygnałów. Świadczą o tym prace publikowane przez osoby zajmujące się różnymi gałęziami nauki od medycyny, poprzez astrofizykę, aż do zastosowań czysto inżynierskich [5, 6].

W literaturze napotkać można publikacje wyników analiz sygnałów wykonanych z użyciem kolejnej metody analizy czasowo-częstotliwościowej. Nosi ona nazwę transformaty Wignera-Ville'a i definiowana jest następująco:

$$W_x(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t+\frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \mathrm{d}\tau \tag{3}$$

gdzie $x^*(t)$ jest sygnałem urojonym, sprzężonym z $x(t)$. Przy tych założeniach niezbędna jest jednak znajomość wielkości:

$$q_x(t,\tau) = x\left(t+\frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \tag{4}$$

w całym przedziale dla $\tau \in (-\infty;+\infty)$, co w praktyce może być kłopotliwe. Zastępuje się więc wyrażenie $q_x(t, \tau)$ jego wersją krótkoczasową i definiuje tzw. rozkład pseudo Wignera-Wille'a (PWVD):

$$PW_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot w(\tau) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \mathrm{d}\tau \tag{5}$$

Przekształcenie WV stosuje się najczęściej przy analizie sygnałów, w których istotny jest charakter modulacji sygnału składowego. Podobnie jak analiza falkowa, umożliwia ona dobór optymalnej rozdzielczości zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [1].

2. Zastosowanie sygnałów emisji akustycznej w diagnostyce

Według [4], wyróżnia się w zależności od procesu zachodzącego w źródle – charakter ciągły i dyskretny sygnału emisji akustycznej (EA). W emisji ciągłej czas trwania sygnału EA (narastania lub zaniku) jest większy od odstępu między impulsami. W emisji akustycznej dyskretnej – odstęp między impulsami jest większy lub równy czasowi ich trwania.

Analizując sygnały emisji akustycznej można uzyskać informację zarówno o jej źródłach, jak też charakterze i właściwościach procesu.

W praktyce przemysłowej typowa aparatura zapisuje podstawowe deskryptory sygnałów emisji akustycznej najczęściej w postaci:

- sumy zliczeń/zdarzeń,
- tempa zliczeń/zdarzeń,
- wartości szczytowej mocy sygnału,
- wartości skutecznej sygnału (RMS).

Podczas oceny zjawisk za pomocą sumy zliczeń EA stwierdzono, że jest ona mniej wrażliwa na oddalenie źródła sygnału od przetwornika pomiarowego i jest jednocześnie bardziej czuła na sygnały krótkotrwałe, natomiast niesie niewiele informacji o energii procesu. Służy ona głównie jako wielkość służąca do oceny aktywności EA. Sumę i tempo zliczeń lub zdarzeń EA rejestruje się zazwyczaj w przypadkach, gdy potrzebne są własności porównawcze np. własności wytrzymałościowych badanych urządzeń [6]. Wartość skuteczna sygnału jest natomiast proporcjonalna do pierwiastka z rejestrowanej mocy sygnału, w związku z tym jego wartość zależy od odległości sensor – źródło EA.

2.1. Sygnały z wtryskiwaczy

Emisja akustyczna (EA) powstaje m.in. podczas wypływu gazów lub cieczy z otworków również w przypadku wtryskiwacza.

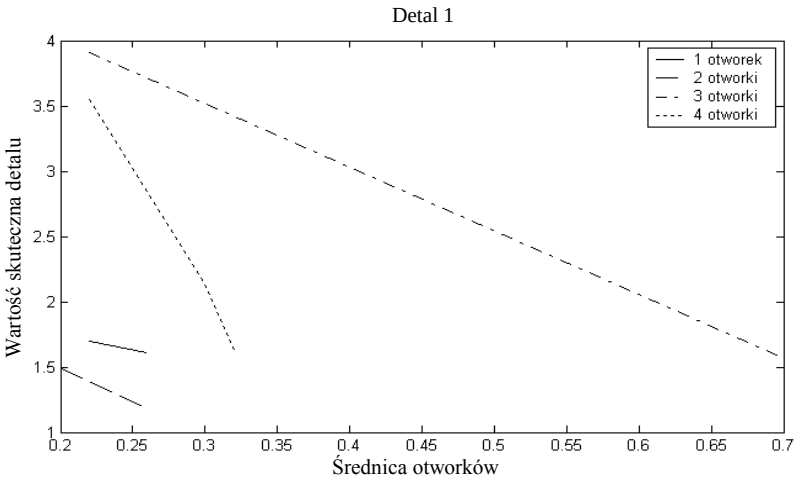
Po wstępnej analizie wykazano, że deskryptorem najbardziej wrażliwym w sensie badawczym, jest wartość skuteczna sygnału (RMS).

Rozpatrzono wpływ średnicy otworka rozpylacza dla pierwszych trzech detali (przekształcenia falkowego) z dekompozycji sygnału uśrednionego z 30 przebiegów. Istnieje wyraźna zależność pomiędzy średnicą otworków badanego rozpylacza, a wartością skuteczną i międzyszczytową poszczególnych detali. Dla detalu pierwszego obserwowany jest spadek zarówno wartości RMS (rys. 1) jak i wartości międzyszczytowej (rys. 2). Jest to jednocześnie niezależne od ilości otworków rozpylacza.

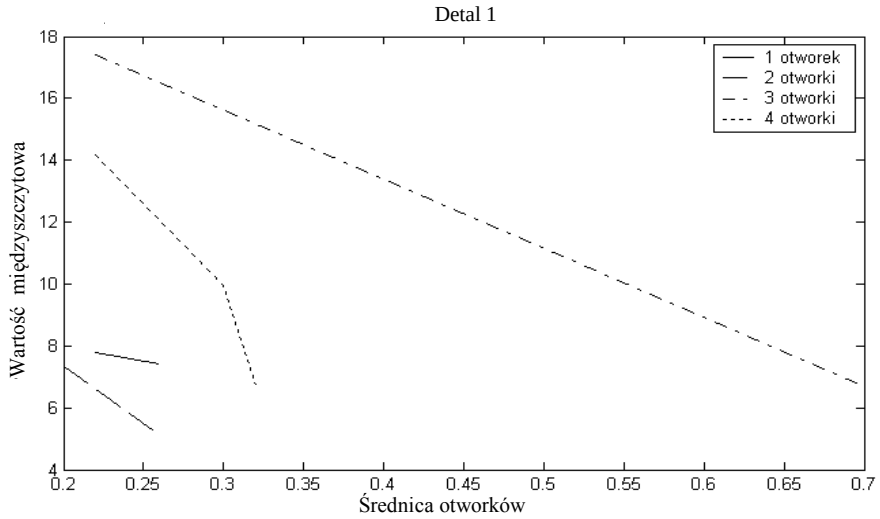
Analizując pozostałe detale (drugi i trzeci), również obserwuje się spadek wymienionych wcześniej estymat. Szczególnym przypadkiem jest rozpylacz czterootworkowy, w którym zachodzi szczególna zmiana wartości estymat w zależności od średnicy otworka (rys. 3 i 4).

W konwencjonalnych układach wtryskowych źródłem sygnałów emisji akustycznej mogą być również zmiany ciśnienia w przewodzie paliwowym wysokociśnieniowym łączącym pompę wtryskową z wtryskiwaczem.

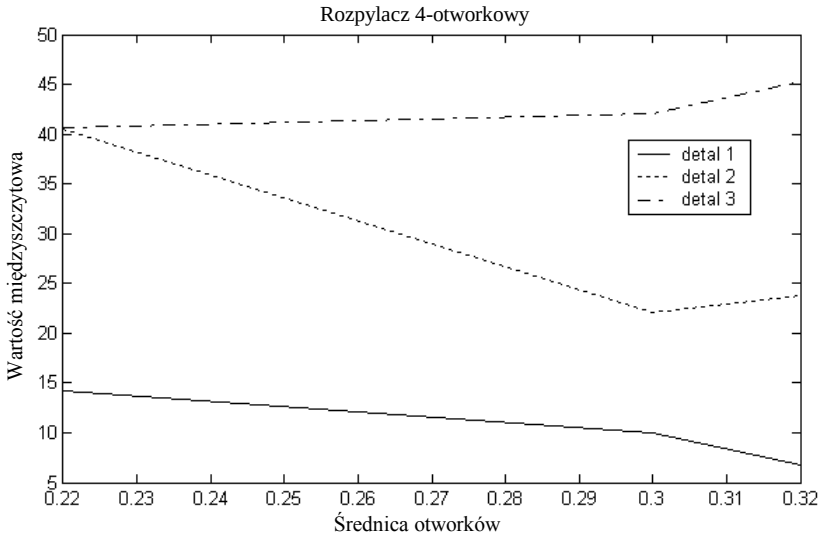
Istnieje ścisła zależność pomiędzy stanem technicznym pompy wtryskowej a sygnałami emisji akustycznej [2, 3, 4].



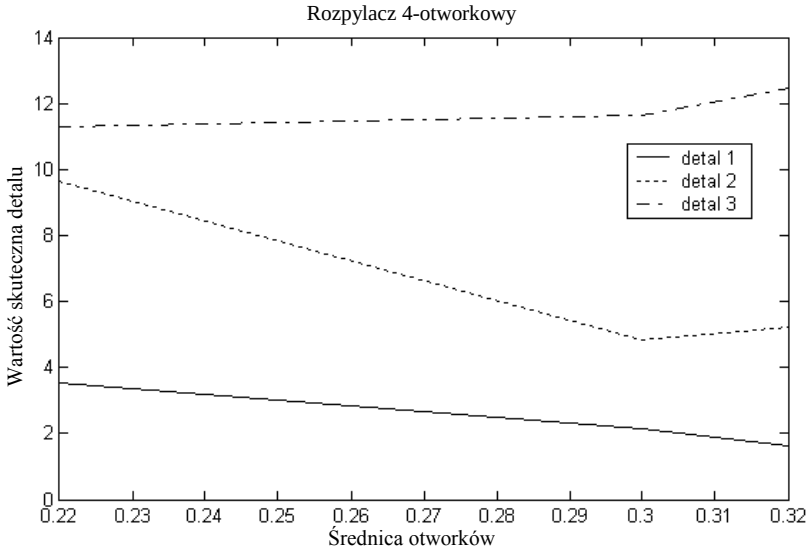
Rys. 1. Wpływ średnicy otworków rozpylacza na RMS detalu
Fig. 1. Detail RMS as a function of the nozzle hole diameter



Rys. 2. Wpływ średnicy otworków rozpylacza na wartość międzyszczytową detalu
Fig. 2. Peak to peak value as a function of the nozzle hole diameter



Rys. 3. Zależność wartości międzyszczytowej od średnicy otworków rozpylacza dla poszczególnych detali
Fig. 3. The number of nozzle holes for each detail



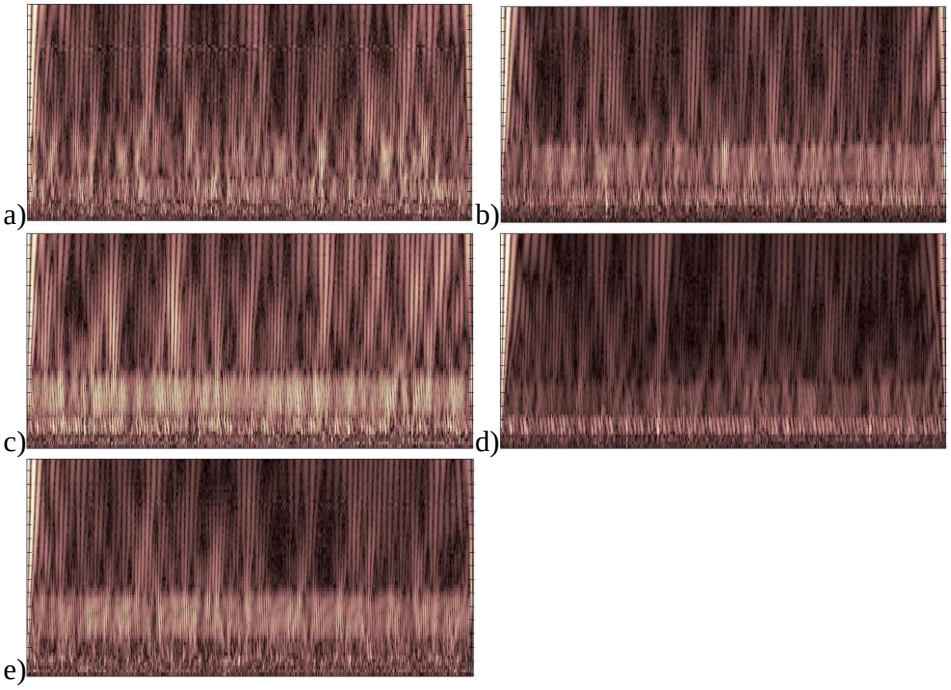
Rys. 4. Zależność wartości RMS od średnicy otworków rozpylacza dla poszczególnych detali
Fig. 4. The number of nozzle holes for each detail

2.2. Sygnały z łożysk tocznych

Stan techniczny łożysk tocznych jest ściśle związany z niezawodnością całego urządzenia, z którym one współpracują. Właściwa praca łożysk jest zapewniona, gdy są spełnione założenia konstrukcyjne, montażowe i eksploatacyjne Zazwyczaj łożyska toczne diagnozowane są przy użyciu metod wibroakustycznych (drganiowych). Źródłem procesów wibroakustycznych są m.in. drgania spowodowane niewłaściwym luzem pomiędzy bieżnią a elementem tocznym, niewłaściwym smarowaniem, uszkodzeniem elementu/ów tocznych. Nawet niewielkie odchylenia okrągłości elementów tocznych wpływają na jakość łożyska. Jest to szczególnie ważne, gdy odchyłka kształtu jest okresowo rozłożona na obwodzie pierścienia lub bieżni elementu tocznego. Łożysko może wówczas wywoływać drgania rezonansowe konstrukcji, w której jest zabudowane (korpusu). Zasadnicze trudności zaczynają się w chwili, gdy należy dokonać diagnozy w trakcie pracy innych urządzeń znajdujących się w pobliżu badanego łożyska. Sygnały drganiowe o stosunkowo niskich częstotliwościach powodują wzbudzanie i wzajemne nakładanie się fal [4].

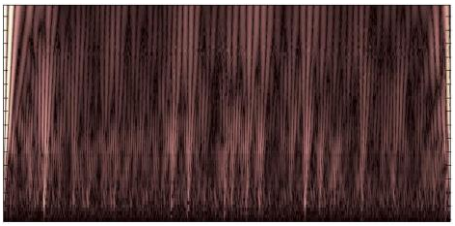
Rozpatrzono wpływ niektórych uszkodzeń łożysk tocznych na sygnał emisji akustycznej. Jednak nie można, na podstawie tak uzyskanych informacji, jednoznacznie wnioskować o stanie łożysk. Podjęto próbę analizy sygnałów czasowych emisji przy użyciu metody falkowej.

Poniższe rysunki przedstawiają wyniki analizy sygnałów pochodzących od łożysk z zasymulowanymi uszkodzeniami.



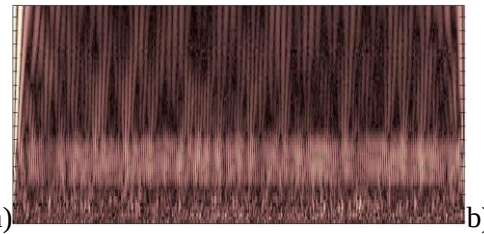
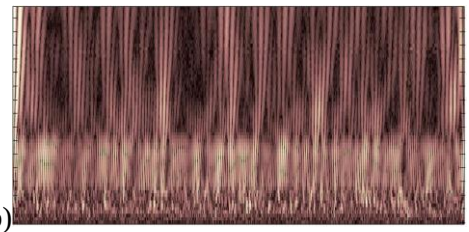
Rys. 5. Sygnały rejestrowane na łożyskach tocznych: a) uszkodzona bieżnia zewnętrzna, b) uszkodzona bieżnia wewnętrzna, c) uszkodzony element toczny, d) łożysko ze zwiększonym luzem montażowym, e) łożysko nowe
Fig. 5. Signals from roll bearings

Na uwagę zasługuje fakt, że przy rozłączeniu przekładni, poziom drgań w miejscu pomiaru spadł kilkunastokrotnie. Wykonano więc analizę sygnału pochodzącego od łożyska nowego przy rozłączonej przekładni. Różnica w wyniku jest znacząca:



Rys. 6. Łożysko bez przekładni
Fig. 6. Bearing with uncoupled gear

Analizie poddano również sygnały pochodzące z przekładni o różnych parametrach pracy. W pierwszym przypadku była to przekładnia o nominalnym luzie międzyzębnym, następnie załączono przekładnię o większym luzie. Również w tym przypadku wykazano różnicę w wynikach analizy.

a)  b) 

Rys. 7. Sygnały zmierzone na przekładni zębatej: a) przekładnia z luzem nominalnym, b) przekładnia z luzem zwiększonym
Fig. 7. Signals from gearbox

Wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów i analiz wynika, że wykorzystanie przekształcenia falkowego dla sygnałów emisji akustycznej niesie informację diagnostyczną możliwą do wykorzystania w diagnozowaniu niektórych niesprawności wtryskiwaczy, łożysk tocznych oraz przekładni zębatej. Zaprezentowane w artykule wyniki są częścią prowadzonych badań nad zastosowaniem sygnałów emisji akustycznej w diagnozowaniu maszyn i urządzeń okrętowych.

Literatura

1. Auger F., Flandrin P., Concalves P., Lenoine O., *TFTB for Matlab*, CNRS, France 1996.
2. Bejger A., *Utilising acoustic emission as an evaluation method of the combustion and injection process of engines on small sailing craft*, II International Scientifically-Technical Conference "Explo-Diesel & Gas Turbine '01" Gdańsk-Międzyzdroje-Kopenhaga 23-27 April 2001, Vol. 1, p. 17 – 24, 2001.
3. Bejger A., *Diagnostyka wtryskiwaczy z wykorzystaniem emisji akustycznej*, Szczecin 2000 (diss.).
4. Bejger A. Burnos T., *Time frequency analysis of some acoustic emission signals*, "Explo-Diesel & Gas Turbine '03" Gdańsk – Międzyzdroje – Lund Maj 2003, s. 53 – 60.
5. Graps A., *Wavelets Are Stars in Astronomy Problems*, SCW, April 1998.

6. Kimura R., Terashima W., Nakai N., Yamada T., Takeda S., *Diagnostic method for 2-stroke diesel engine by measurement of vibration on cylinder-jacket observation of change in normal vibration pattern,* Journal of MESJ, Vol. 33, No. 10, Kobe 1997.
7. Moszczyński L, Ranachowski Z., *Rejestracja emisji akustycznej w badaniach przemysłowych*, Przegląd Mechaniczny 9/2002, s. 36 – 39.
8. Ranachowski Z., *Metody pomiaru i analizy sygnału emisji akustycznej*, Prace IPPT, PAN nr 1/97, Warszawa 1997.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Andrzej Piętak, prof. WAT
prof. dr hab. Yury Kravtsov

Adresy Autorów

dr inż. Artur Bejger
mgr inż. Tomasz Burnos
Akademia Morska w Szczecinie
Zakład Diagnostyki i Remontów Maszyn Okrętowych
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin