



Redukcja zakłóceń wybranych sygnałów pomiarowych statków morskich

JAN MONIETA

Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny,
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1-2, j.monieta@am.szczecin.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono problemy występujące przy przetwarzaniu sygnałów wielkości mechanicznych metodami elektrycznymi. W zależności od wielkości mierzonej, lokalizacji czujników i pasma częstotliwości analizy, są one różnie zakłócone. Zaprezentowano wyniki zastosowania analizy parametrów procesów roboczych i towarzyszących okrętowych średnioobrotowych silników tłokowych w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz analizy falkowej w celu wyboru racjonalnej metody. Zastosowany program akwizycji sygnałów pozwala na wykonanie wybranych analiz sygnałów w różnych dziedzinach oraz transformację danych do innych programów. Przedstawiono sposoby redukcji zakłóceń w poszczególnych etapach ich występowania i analizy.

Słowa kluczowe: sygnały elektryczne, dziedzina analizy, zakłócenia pomiarowe

DOI: 10.5604/12345865.1116907

1. Wstęp

Wzrost wymagań dotyczących niezawodności i bezpieczeństwa obiektów dynamicznych i instalacji statkowych jest powodem rozwoju teorii i praktyki pomiarów [1]. Znaczna złożoność obiektów pływających, a zwłaszcza systemów energetycznych, utrudnia kontrolowanie ich procesów przez operatorów, ze względu na dużą liczbę mierzonych i monitorowanych parametrów, które są zakłócanie. Silniki spalinowe napędu głównego lub pomocnicze są wielowymiarowymi obiektami o dużym poziomie oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych, czego efektem są szумы i zmiany składowej stałej sygnału [2, 3, 4, 5].

Sygnały oprócz pożądanej informacji zawierają również zakłócenia, które są spowodowane m.in. właściwościami toru pomiarowego i procesami towarzyszącymi

działaniu obiektu. Sygnał składa się ze składowej zdeterminowanej, zawierającej użyteczną informację, oraz składowej losowej, czyli szumu. Dlatego stosuje się różne metody separacji sygnału użytecznego od szumu. Procedura filtracji dotyczy rozdzielania informacji o pożądanych właściwościach od informacji o niepożądanych właściwościach [6]. Często w filtracji sygnałów diagnostycznych taka operacja jest realizowana na podstawie wiedzy eksperta, metodą prób i błędów.

W pracy podjęto próbę rozwiązania problemów występujących w czasie przetwarzania sygnałów wielkości mechanicznych metodami elektrycznymi cieplnych maszyn tłokowych współpracujących z elektrownią. W zależności od wielkości mierzonej, lokalizacji czujnika i pasma częstotliwości analizy, są one różnie zakłócone [3, 6]. Przedstawiono wyniki zastosowania pomiarów i analizy parametrów procesów roboczych i towarzyszących okrętowych średnioobrotowych silników tłokowych w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz analizy czasowo-częstotliwościowej do ich diagnozowania.

Badane procesy robocze w tłokowych silnikach o zapłonie samoczynnym współpracujące z maszynami elektrycznymi, to procesy w instalacjach silnika, w cylindrach silników, procesy energetyczne w maszynach i instalacjach elektrycznych. Główne procesy towarzyszące to procesy cieplne, drgania, hałas, emisja spalin itp.

2. Metoda badań

Badania wykonano w Laboratorium Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie oraz na statkach krajowych armatorów. Silniki spalinowe armatora są badane przez autora za pomocą przyrządów pomiarowych znajdujących się na wyposażeniu statku, jak również z zastosowaniem przenośnego systemu diagnostycznego (rys. 1). Sygnały przetwarzane za pomocą przenośnego systemu pomiarowego były rejestrowane i porównywane z danymi odniesienia w bazie danych i wiedzy [7].

Badano parametry procesów roboczych zapewniających realizację podstawowych funkcji użytkowych, jak: ciśnienie w podsystemach wtryskowych i w cylindrach silników, pulsacja mediów oraz procesy towarzyszące (powstające jako wtórny efekt podstawowych procesów: przemieszczenia, przyspieszenia i prędkości drgań).

Filtr to obwód elektryczny selektywny (przepuszczający lub tłumiący) w stosunku do pewnych składowych sygnału o określonych częstotliwościach. Celem filtracji jest takie przekształcenie zarejestrowanego sygnału, aby uzyskać wyodrębnienie pożądanej informacji.

3. Tor pomiarowy

Czujniki pomiarowe były umieszczone na silnikach spalinowych i prądnicach (rys. 1b). Zastosowano czujniki elektryczne tensometryczne, dokonujące

przetwarzania przebiegu zmiany ciśnienia w komorze spalania na sygnał elektryczny. Były to czujniki parametryczne wymagające zasilania i wzmacniania [8]. Wzmacniacz pomiarowy służy do wzmocnienia sygnału z czujników tensometrycznych oraz do przetworzenia go na standardowy sygnał wyjściowy. Mostek tensometryczny zasilany jest ze wzmacniacza napięciowego. Wzmacniacz posiada potencjometry do regulacji sygnału pomiarowego i do regulacji wzmocnienia. Stosowano także czujniki generacyjne przebiegu ciśnień i procesów towarzyszących.

Czujniki impulsu początku akwizycji sygnałów i położenia wałów badanych silników mocowano za pomocą gwintów, którymi były czujniki fotooptyczne. Z czujników pomiarowych przekazywano sygnały do terminalu przyłączeniowego, który służy do połączenia czujników z kartą pomiarową zamontowaną w przenośnym komputerze. Komputer przenośny oraz czujniki fotooptyczne zasilane były za pomocą zasilaczy. System pomiarowy (SP) składa się ze zbioru elementów pomiarowych EP i relacji między nimi R [9]:

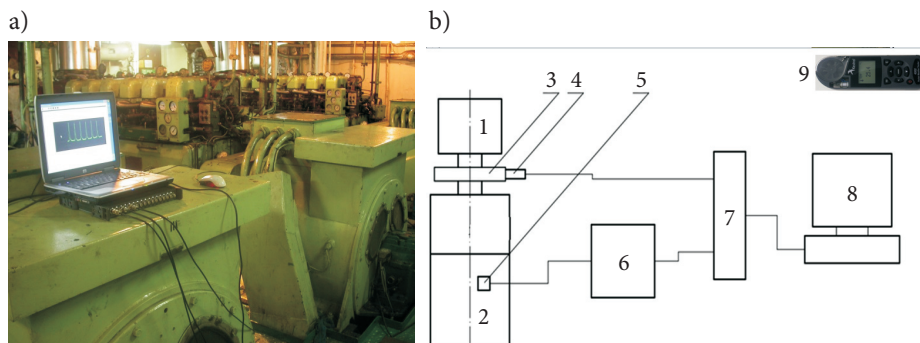
$$SP = \langle EP, R \rangle, \quad (1)$$

$$EP = \{PP, \acute{S}P, P_rP\}, \quad (2)$$

gdzie: SP — system pomiarowy;
 EP — elementy systemu pomiarowego;
 R — struktura pomiarowa SP ;
 PP — podmiot pomiaru;
 $\acute{S}P$ — środki pomiarowe;
 P_rP — przedmiot pomiaru.

4. Wstępne przetwarzanie sygnałów

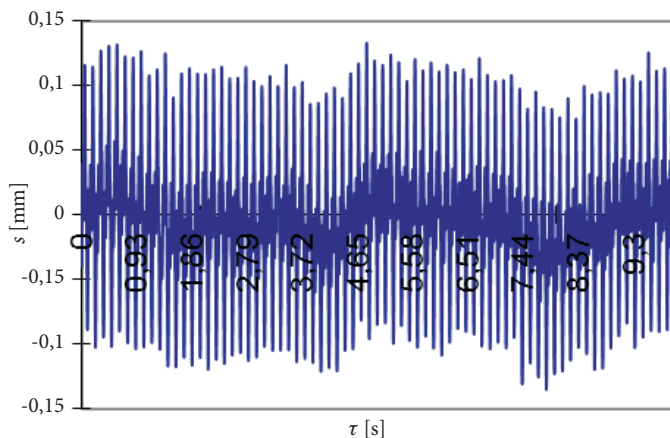
Sygnały analogowe z czujników zwykle nie mogą być przesyłane bezpośrednio do przetwornika analogowo-cyfrowego, lecz wymagają wstępnego przygotowania przez układ zasilająco-wzmacniający. Sygnał napięciowy powinien być przefiltrowany w celu wyeliminowania zakłóceń, a także eliminacji składowych o częstotliwościach wyższych niż połowa częstotliwości próbkowania w przetworniku [10]. Stosowano filtry częstotliwościowe modyfikujące widmo amplitudowe przechodzących przez nie sygnałów [6]: dolnoprzepustowe, górnoprzepustowe, pasmowo-przepustowe, pasmowo-zaporowe. Sygnały filtruje się, aby uzyskać: redukcję zakłóceń sygnału (od sieci energetycznej, innych urządzeń itp.), zmiany charakterystyki widmowej sygnału i wyodrębnienie zadanych składowych sygnału spośród jego innych składowych [1, 6].



Rys. 1. Widok badanych zespołów prądowców wraz z przenośnym systemem do akwizycji i przetwarzania sygnałów pomiarowych (a) oraz schemat układu pomiarowego (b): 1 — prądnica; 2 — silnik spalinowy; 3 — koło zamachowe; 4 — czujnik położenia wału korbowego; 5 — czujnik pomiarowy; 6 — wzmacniacz (zasilacz); 7 — terminal przyłączeniowy; 8 — komputer; 9 — urządzenie monitorujące pogodę

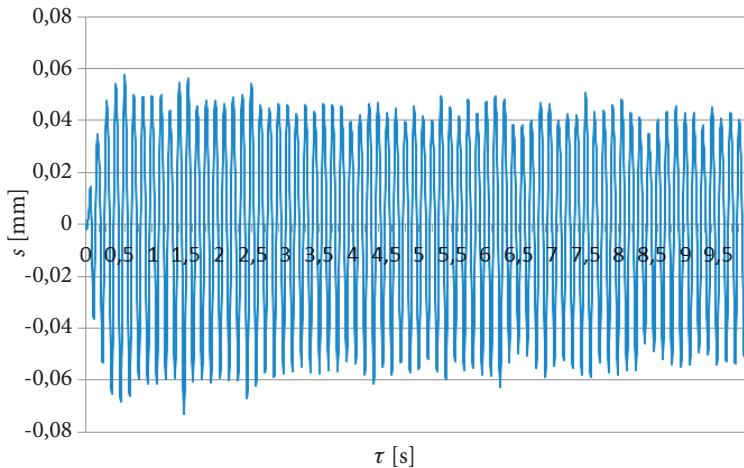
Do akwizycji sygnałów stosowano program DaqView firmy IOtech [3]. DaqView to oprogramowanie konfiguracyjno-pomiarowe, które współpracuje z systemami pomiarowymi różnych firm. Pozwala ono konfigurować urządzenia oraz dokonywać pomiarów. Oprogramowanie DaqView umożliwia dokonywanie ustawień, obserwowanie wyników pomiarów oraz zapisywanie ich w czasie rzeczywistym. Program ten pozwala na wykonanie wybranych analiz sygnałów w różnych dziedzinach oraz transformację danych do innych programów.

W pomiarach zastosowano filtry analogowe, które nie zapewniły usunięcia istotnych zakłóceń w niskim paśmie częstotliwości zbliżonym do częstotliwości

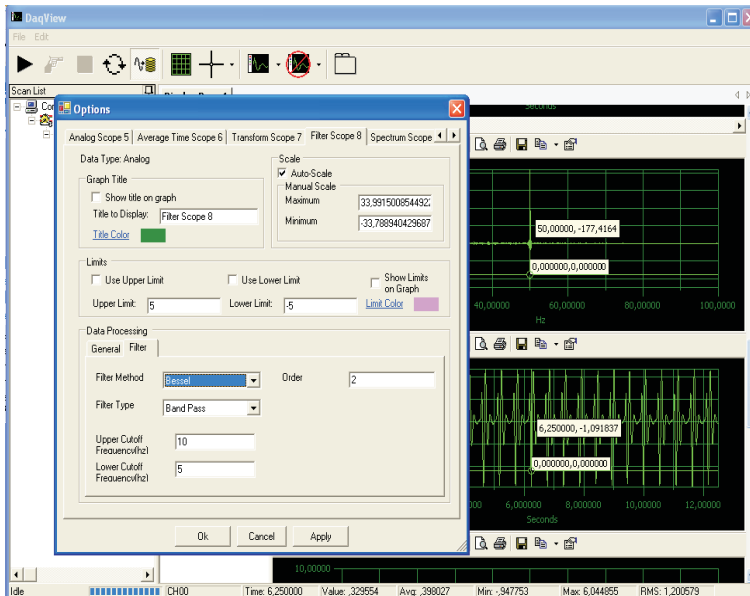


Rys. 2. Przebieg czasowy sygnału przemieszczeń drgań przetwarzanych na przewodzie wysokiego ciśnienia silnika spalinowego w paśmie częstotliwości 0÷100 Hz

sieciowej (rys. 2). Dalsza eliminacja zakłóceń odbywała się w czasie analizy sygnałów z zastosowaniem filtrów cyfrowych (rys. 3). Rysunek 4 pokazuje w programie DaqView blok filtrujący umożliwiający wybór kilku rodzajów operacji cyfrowego filtrowania: dolno- i górnoprzepustowe, pasmowo przepustowe, pasmowo zaporowe oraz wybór pożądaney charakterystyki filtru.



Rys. 3. Efekt zastosowania filtru Bessela w programie DaqView dla sygnału przemieszczeń drgań



Rys. 4. Okno dialogowe filtrów w programie DaqView

Filtr Butterwortha nie ma zafalowań w paśmie przepustowym i zaporowym oraz posiada charakterystykę fazową najbardziej zbliżoną do liniowej, dlatego był najczęściej wykorzystywany. Prototyp Bessela może być stosowany tylko dla filtrów dolnoprzepustowych, odznacza się najbardziej liniową fazą ze wszystkich prototypów [1].

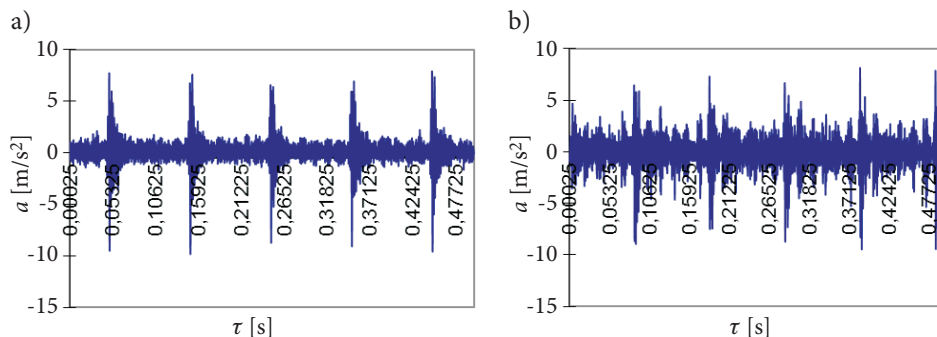
5. Przykładowe wyniki badań

5.1. Analiza w dziedzinie czasu

Metoda przeprowadzonych badań polegała na pomiarze parametrów procesów roboczych (ciśnien, przemieszczeń) i towarzyszących wielkości kinematycznych (przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń drgań) dla poszczególnych cylindrów i ich analizie w dziedzinie czasu rzeczywistego (rys. 4), przy różnych obciążeniach silników o zapłonie samoczynnym.

Podczas badań kilku silników spalinowych stwierdzono, że sygnały przetwarzane z cylindrów znajdujących się w pobliżu prądnicy i urządzeń elektrycznych są bardziej zakłócone (rys. 5). Stan taki może sugerować różnice w stanie technicznym.

Istnieje wiele miar, jakie można wyznaczyć z sygnałów w dziedzinie czasu. Najczęściej stosowane to: wartość średnia, amplituda, zakres, współczynnik szczytu, wartość skuteczna, wariancja (lub odchylenie standardowe), skośność, kurtoza, moc sygnału itp. [1, 2, 6, 11].

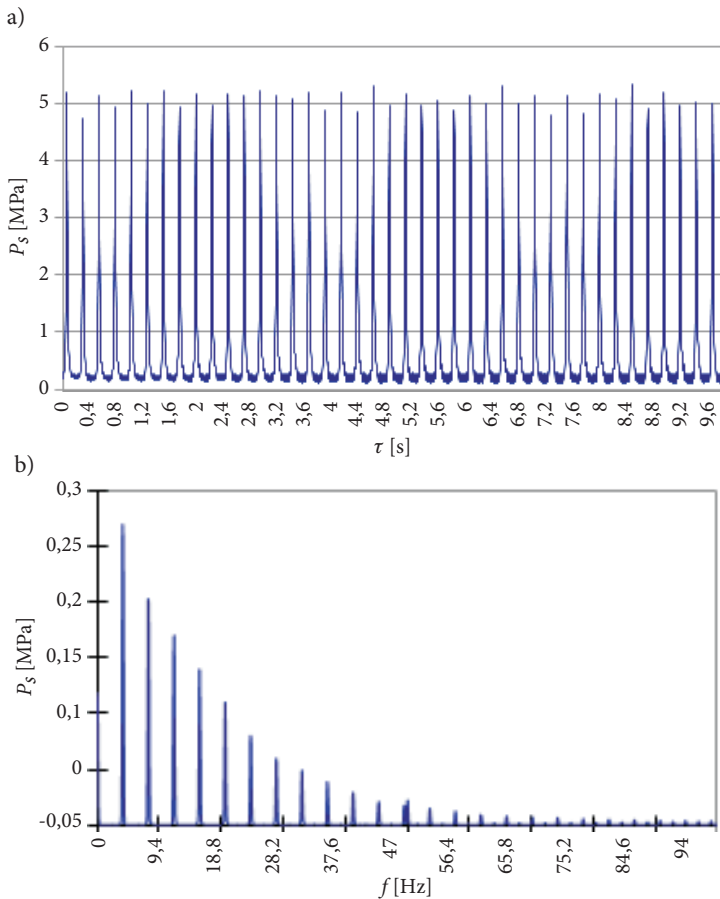


Rys. 5. Przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań w podsystemie wtryskowym dla cylindra nr 1 przy wolnym końcu wału silnika a) i dla cylindra nr 6 przy prądnicy i tablicy sterującej

Problemem badań w dziedzinie czasu była zmiana składowej stałej w czasie, w tym przesuwanie zera, co rozwiązuje analiza w dziedzinie częstotliwości.

5.2. Analiza w dziedzinie częstotliwości

Wiele maszyn generuje sygnały poliharmoniczne, a nawet poliokresowe [1]. Sygnały poliharmoniczne to sygnały okresowe złożone, które oprócz składowej podstawowej o częstotliwości f_p (najczęściej obrotowej), zawierają składowe nadharmoniczne o częstotliwości if_p ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) [1, 10]. Sygnał poliokresowy to sygnał złożony składający się z co najmniej dwóch sygnałów poliharmonicznych o różnych częstotliwościach podstawowych [1]. Sygnały ciśnienia w podsystemie wtryskowym oraz przebiegu ciśnienia w cylindrach badanych silników były poliharmoniczne (rys. 6). Z rysunku 6 wynika, że jest to ciąg impulsów prostokątnych, gdzie co określony czas T pojawia się impuls od procesu spalania.



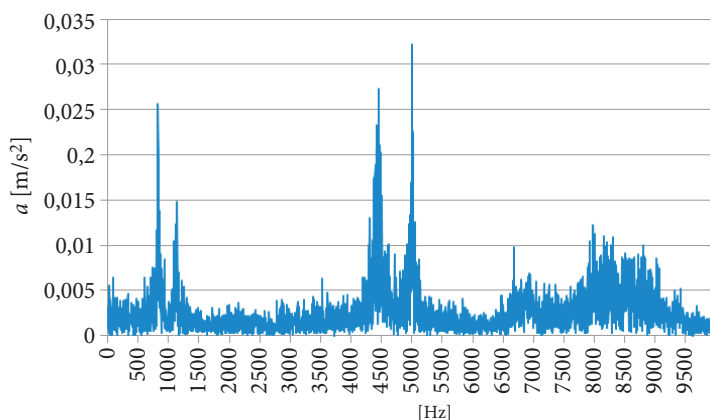
Rys. 6. Przykładowy przebieg czasowy a) i widmo poliharmoniczne b) przebiegu ciśnienia w cylindrze tłokowego silnika spalinowego

Z rysunku 6 wynika duża niepowtarzalność impulsów pochodzących od obiegu czynnika roboczego w cylindrze, które w paśmie częstotliwości 0÷2500 Hz nie potwierdziły się [3]. Podjęto zatem próbę odfiltrowania tego zakłócenia.

Przy analizie sygnałów w czasie wstępnych badań eksperymentalnych dokonano wyboru racjonalnego pasma częstotliwości [3]. Wybrany zakres częstotliwości analizy miał wpływ na wartości amplitud poszczególnych składowych. Sygnały były analizowane w różnych pasmach częstotliwości, gdzie wykazano przydatne pasma. W dziedzinie częstotliwości łatwiej wyodrębnić składowe przejawiające liniową zależność ze stanem technicznym [3].

W celu wyeksponowania w widmie składowych z jedną wybraną częstotliwością podstawową f_p można wykonać sumowanie synchroniczne w dziedzinie czasu. Innym sposobem jest próbkowanie synchroniczne z częstotliwością będącą nad wielokrotnością częstotliwości f_p , co nazwano analizą rzędów [1].

Sygnały procesów towarzyszących okazały się często poliokresowe i bardziej zakłócone. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe widmo przyspieszeń drgań odbierane na kadłubie silnika w pobliżu łożysk wału korbowego.



Rys. 7. Przykładowe widmo poliokresowe sygnału przyspieszeń drgań układu tłokowo-korbowego

W tej analizie chodziło o uzyskanie najlepszej rozdzielczości częstotliwościowej składowych widm. Stosowano klasyczne i zaawansowane metody analizy częstotliwościowej [1, 3, 6, 10].

5.3. Analiza czasowo-częstotliwościowa

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój metod analizy czasowo-częstotliwościowej przy poszukiwaniu nowych, bardziej efektywnych [6, 10]. Do podstawowych metod w tej grupie zalicza się transformację: krótkoczasową Fouriera,

zdyskretyzowaną Gabora, falkową, dystrybucję Wignera-Ville'a itp. W transformacie falkowej mogą być stosowane takie funkcje bazowe, jak: Haara, Gausa, Meyera, Daubechues, Morleta. Wśród tych metod można wyróżnić transformatę falkową (WT), która znalazła zastosowanie m.in. w odszumianiu sygnałów [1, 10].

Dla danej falki $\psi(\tau)$ można skonstruować rodzinę falek indeksowaną parametrem a [3, 10]:

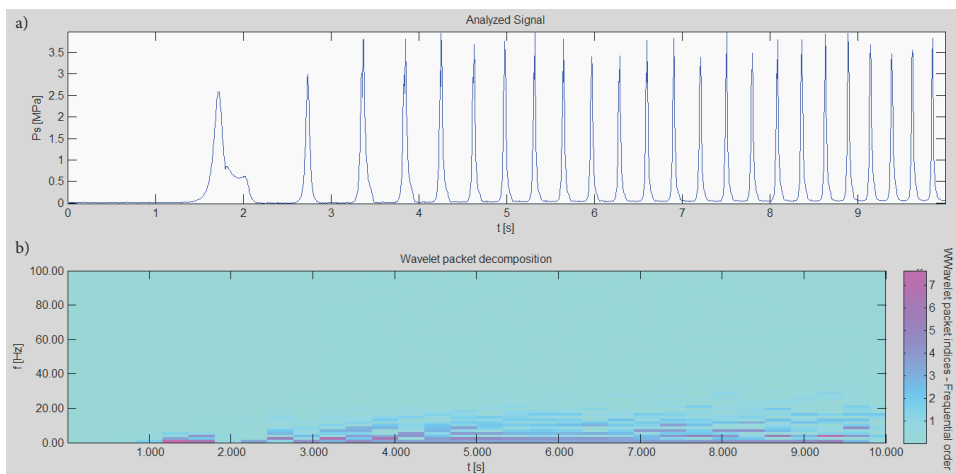
$$\psi_a(\tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau}{a}\right) \quad a \neq 0, \quad (3)$$

gdzie $1/\sqrt{|a|}$ jest czynnikiem skali.

Za pomocą parametru b funkcję $\psi_a(\tau)$ poddaje się translacji, otrzymując dwu-parametrową rodzinę:

$$\psi_{a,b}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau-b}{a}\right) \quad \text{przy } a, b \text{ rzeczywistych i } a \neq 0. \quad (4)$$

Metody zastosowania w teorii falek oparte są na szybkich algorytmach FWT (*Fast Wavelet-Transformation*) do wyznaczania wielkości fizycznych na podstawie wyników pomiarów. Badane procesy były dla silników napędzających prądnice ustalone ze względu na prędkość obrotową (rys. 6), a nieustalone ze względu na zmiany obciążenia. Dla silników napędu głównego zmianom ulegała zarówno prędkość obrotowa, jak i obciążenie. Analiza czasowo-częstotliwościowa okazała się przydatna do badania rozruchu i zatrzymania silnika (rys. 8).



Rys. 8. Przebieg czasowy a) i mapa czasowo-częstotliwościowa b) sygnału ciśnienia cylindrowego silnika spalinowego podczas rozruchu

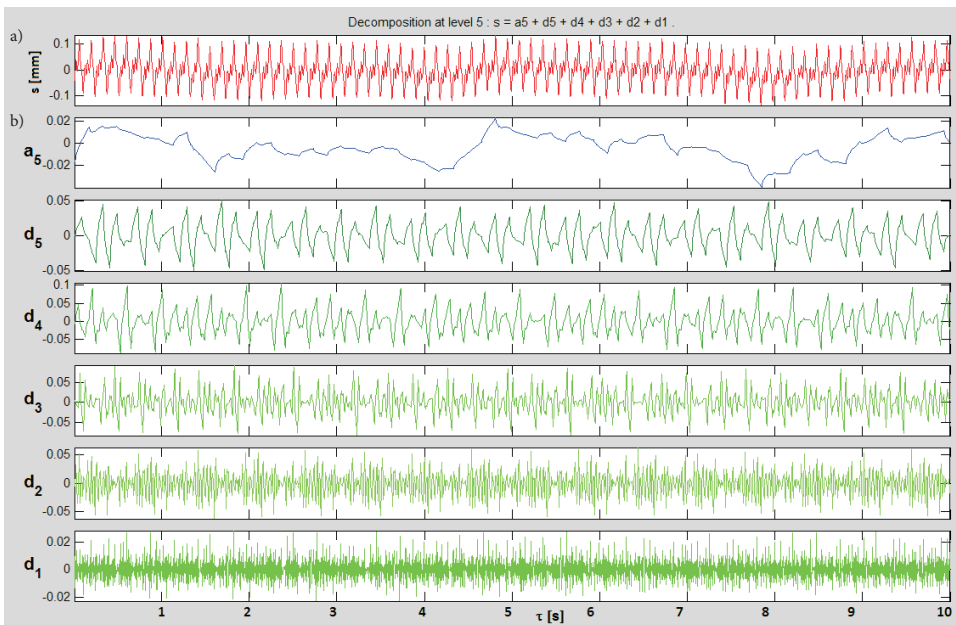
W metodzie analizy czasowo-częstotliwościowej długość okna decyduje o rozdzielczości w dziedzinach czasu i częstotliwości oraz występuje duża redundancja sygnału. Redundancja to nadmiar informacji, który stanowi jeden z problemów w diagnostyce technicznej [1].

Ocenę przydatności miar w poszczególnych dziedzinach analizy przedstawiono w pracach [2, 3]. Wybrane symptomy diagnostyczne zweryfikowano badaniem stanu technicznego metodami geometrycznymi i funkcjonowania obiektu [2, 12] wraz z oceną niepewności pomiarów [4, 13].

5.4. Zastosowanie dekompozycji falkowej do separacji zakłóceń

Podjęto próbę zastosowania dekompozycji falkowej do odsumowania sygnałów. Daną transformację falkową definiuje jedna macierzysta funkcja falkowa, a pod wpływem zmiany parametru skali a i parametru przesunięcia b otrzymuje się rodzinę falek, która jest wykorzystywana do dekompozycji analizowanego sygnału $s(t)$ na składowe o różnym poziomie detali. Zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej prowadzi do zmniejszenia liczby współczynników o połowę wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji sygnału (rys. 9):

$$S = a_1 + d_1 = a_2 + d_2 + d_1 = a_3 + d_3 + d_2 + d_1. \quad (5)$$



Rys. 9. Przebieg czasowy sygnału przemieszczeń drgań a) i dekompozycja falkowa b) sygnału z rysunku 2

W trakcie dekompozycji sygnału jest on rozkładany na element dolnoprzepustowy (a) i górnoprzepustowy (d). Dalsza dekompozycja dokonywana jest częścią dolnoprzepustową wykonaną w poprzednim etapie. Sygnały zostały odszumione przez falki symlet i Daubechies, jednak dla falki symlet odszumienie wydaje się dokładniejsze. Jednak i tutaj na tym etapie analizy wyników odszumiania nie można uznać za zadowalające, ponieważ sygnały z poszczególnych poziomów dekompozycji różnią się od sygnału wyjściowego.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono problemy związane z zakłóceniami sygnałów procesów roboczych i towarzyszących rejestrowanych dla tłokowych silników spalinowych w warunkach laboratoryjnych i eksploatacji statków morskich. Zakłócenia można minimalizować na etapie budowy torów pomiarowych, akwizycji oraz obróbki sygnałów. Zaawansowane metody przetwarzania sygnałów umożliwiają uzyskanie bardzo znacznej liczby miar dostępnych sygnałów, ale jednocześnie wymagają zbadania dużej liczby wariantów oraz nie gwarantują sukcesu.

Przedstawiono przykładowe symptomy pomiarowe, które odznaczają się różnym poziomem sygnału użytecznego do szumu oraz odmienną informatywnością. Eliminacja zakłóceń może odbywać się za pomocą różnych filtrów analogowych i cyfrowych. Nie są to filtry dobrane i działające automatycznie, lecz konieczne jest wykonanie sprawdzeń eksperymentalnych.

W badaniach wskazano na zalety i ograniczenia poszczególnych metod analizy sygnałów i redukcji zakłóceń w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej. Wskazuje się na potrzebę dalszego poszukiwania metod minimalizacji zakłóceń i odszumiania zarejestrowanych sygnałów.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na „X Szkole-Konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo — MWK'2014”, Waplewo, 27-30 maja 2014 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.07.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 10.07.2014 r.

LITERATURA

- [1] ŻÓŁTOWSKI B., CEMPEL C. (red.), *Inżynieria diagnostyki maszyn*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom, 2004.
- [2] MONIETA J., *Diagnostics of course a work process in cylinders of marine internal combustion engines using vibration signal*, Diagnostyka — Applied Structural Health, Usage and Condition Monitoring, nr 2(62), 2012, 37-41.
- [3] MONIETA J., *Zastosowanie analizy przebiegu ciśnienia w cylindrach okrętowych silników spalinowych w różnych dziedzinach do diagnostyki w warunkach eksploatacji*, Combustion Engines, 3(154), 2013, 104, cd. 153-160.

- [4] MONIETA J., *Ćwiczenia laboratoryjne z termodynamiki*, praca niepublikowana, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin, 2008.
- [5] SERDECKI W. (red.), *Badania silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2012.
- [6] ZIELIŃSKI T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, WKiŁ, Warszawa, 2009.
- [7] MONIETA J., *A database of selected marine diesel engines for diagnostic needs*, Journal of Energy and Power Engineering, vol. 7, no. 6, 2013, 1032-1039.
- [8] PIOTROWSKI J. (red.), *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*, WNT, Warszawa, 2009.
- [9] GIRTLEER J., *Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych*, Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Szczecin, 1997.
- [10] BARCZEWSKI R., *Vibroacoustic signal analysis methods*, [in:] *COST 534 Methods and Concepts for Prestressed Concrete Structures. Final report*, ed. R.B. Polder, part III, Delft, The Netherlands, 2009, 187-191.
- [11] SASAKI S.T., HASHIMOTO T., *Vibration monitoring for fault diagnosis of cylinders in marine diesel engine*, by (ClassNK), CIMAC, paper 69, Japan, 2004, 1-11.
- [12] JERMAK C., MAJCHROWSKI R., MONIETA J., *Zastosowanie pomiarów geometrycznych i analizy obrazów do odwzorowania modelu geometrycznego aparatury wtryskowej silnika okrętowego*, Combustion Enginesnr, 3(146), 2011, 71-72, cd. 1-8.
- [13] ARENDARSKI J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.

J. MONIETA

Interference reduction selected measurement signals of ships

Abstract. The paper presents problems encountered at the signal processing of mechanical values with electric methods. Depending on the measured quantity, the location of the sensors and the analysis frequency band, they are differently interferences. The article presents the results of applying the analysis of parameters of working and accompanying process marine medium speed reciprocating engines in the time, amplitude, frequency domain and wavelet analysis to select a reasonable method. The applied signal acquisition program allows you to perform some analysis of signals in different areas and the transformation of the data to other programs. The ways of interference reducing at various stages of their occurrence and analysis are presented.

Keywords: electrical signals, domain analysis, measurement interference