

*dr inż. Piotr Boguś*  
*Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”*  
*Akademia Medyczna w Gdańsku*  
*mgr inż. Rafał Grzeszczyk*  
*Automex S.A. Gdańsk*  
*prof. dr hab. inż. Jerzy Merkiś*  
*Politechnika Poznańska*  
*Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”*

## Diagnostyka pokładowa silników wysokoprężnych z wykorzystaniem chwilowej analizy sygnałów

*Omówiono zastosowanie metod chwilowej analizy sygnałów do diagnostyki silnika wysokoprężnego na bazie sygnałów wibroakustycznych pozyskiwanych z silnika. Analiza chwilowa bierze pod uwagę chwilowe wartości wybranych parametrów sygnału, co okazuje się szczególnie przydatne w diagnostyce silnika, w perspektywie wprowadzenia obligatoryjnych systemów diagnostyki pokładowej. Przedstawiono krótki opis podstawowych metod analizy chwilowej oraz przykład zastosowania analizy chwilowej do sygnałów wibroakustycznych pochodzących od czujników przyspieszenia zainstalowanych na korpusie silnika.*

### 1. Wstęp

Ostatnie lata pokazały wzrost znaczenia nowoczesnych metod diagnostyki silników, szczególnie tzw. diagnostyki pokładowej (amerykańska norma OBD II i europejska EOBD dla samochodów osobowych). Zadaniem systemów diagnostyki pokładowej jest stałe monitorowanie podstawowych parametrów związanych z układem napędowym, przede wszystkim tych, które związane są z emisją zanieczyszczeń do atmosfery.

W zakresie silników lokomotyw spalinowych pojawiły się już ściśle zdefiniowane normy emisji spalin, przede wszystkim karty UIC 623 [15,16,17]. W najbliższej przyszłości można się spodziewać obostrzenia przepisów w zakresie emisji spalin oraz wprowadzenia obligatoryjnych systemów diagnostyki pokładowej podobnych do OBD dla samochodów osobowych [12].

Rozwój systemów OBD oraz zaostrożenie norm emisji spalin wymagają nowych rozwiązań w zakresie diagnostyki silników spalinowych. Szczególnie dotyczy to silników wysokoprężnych dużej mocy dla lokomotyw spalinowych. Na tym polu metody chwilowe wydają się szczególnie przydatne do diagnostyki silnika na podstawie sygnałów wibroakustycznych pozyskanych z silnika. Analiza chwilowa bazuje na pojęciu tzw. chwilowego widma Fourierowskiego i pokazuje chwilowe zmiany wybranych parametrów opisujących sygnał, czyli pośrednio stan silnika.

Silniki wysokoprężne są źródłem dużej ilości sygnałów, które nadają się do analizy – są to, na przykład, sygnały wibracyjne od czujników przyspieszeń umieszczonych na korpusie silnika, całość sygnałów akustycznych, sygnały pochodzące od detektorów prądów jonowych, sygnały reprezentujące prędkość kątową wału korbowego, sygnały ciśnieniowe, nie wspominając o sygnałach wizyjnych odtwarzających np. nagranie głowic silników [10, 11].

### 2. Widmo chwilowe

Typowe Fourierowskie widmo sygnału reprezentuje całościową charakterystykę tego sygnału. Z takiego widma nie wynika nic na temat chwilowych lub lokalnych zmian (zaburzeń) sygnału. Jeśli interesują nas tylko własności globalne sygnału, to widmo Fourierowskie wystarczająco opisuje sygnał. Jeśli jednak dodatkowo interesują nas niektóre chwilowe lub lokalne własności sygnałów, to widmo Fourierowskie opisuje sygnał w sposób niewystarczający. Należy zaznaczyć, że w praktyce mamy do czynienia z takimi przypadkami dosyć często. Na przykład, sygnał dźwiękowy mowy lub muzyki, sygnały generowane przez urządzenia mechaniczne mają widma zmienne w czasie i nie można tego wywnioskować z całościowego widma tego sygnału.

Aby uwydatnić chwilowe lub lokalne własności sygnału w widmie można w ogólności wykorzystać dwie metody:

1. metodę opartą o widmo chwilowe Fouriera [1, 2, 8, 13, 14],
2. metodę opartą o widmo falkowe [6].

W metodzie pierwszej wykorzystywane jest widmo chwilowe, czyli krótkotrwałe widmo w bramce biegnącej. Wyznacza się widmo Fouriera dla krótkiego przedziału czasu, który przesuwają się wraz z chwilą bieżącą. A więc każdej chwili przyporządkowane jest widmo, które w różnych chwilach może być różne. W ten sposób możemy wykrywać zmiany widma w czasie. W metodzie drugiej wykorzystywane jest widmo falkowe. Dla całego czasowego przedziału istnienia sygnału wyznacza się widmo falkowe, w którym każda składowa ma swoją amplitudę i swoje położenie na osi czasu. W ten sposób z widma falkowego bezpośrednio wynikają chwilowe własności sygnału. W artykule skupiono się na metodach bazujących na chwilowym widmie Fouriera.

Chwilowe widmo ciągle może być definiowane na różne sposoby. Tutaj opisano widmo znane z literatury jako krótkotrwałe transformata Fouriera [1, 2, 8, 14]. Dla  $u(i)$ ,



będącej dyskretną funkcją czasu, przyjęto następującą definicję

$$U(f, n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} u(i) h(n-i) e^{-j2\pi f T i} \quad (1)$$

gdzie  $h(n)$  to pewna funkcja czasu, nazywana funkcją okna (bramki) lub funkcją wagi.

Widmo obliczone ze wzoru (1) jest widmem ciągłym i okresowym ze względu na częstotliwość  $f$ . Zależy także od postaci funkcji okna  $h(n)$ , i co jest bardzo ważne, zależy od chwili  $n$ . Dla transformacji Fouriera (1) funkcja okna  $h(n)$  powinna mieć kształt typu „okno” i to zarówno po stronie czasu jak i po stronie widma.

Zakłada się dalej, że dla funkcji okna  $h(n)$  istnieje transformata Fouriera

$$H(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n) e^{-j2\pi f n T} \quad (2)$$

Wymaganie, aby funkcja  $h(n)$  była oknem zarówno po stronie czasu jak i po stronie częstotliwości dotyczy więc funkcji  $h(n)$  i  $H(f)$ . Idealem byłoby, aby obydwie te funkcje były prostokątne. Niestety nie jest to możliwe. Wydłużając okno  $h(n)$  skraca się szerokość okna  $H(f)$  i odwrotnie, wydłużając szerokość okna  $H(f)$  skraca się okno  $h(n)$ . Oprócz okien prostokątnych wykorzystuje się inne rodzaje okien (np. okna Bartleya, Hanninga, Bleckmana).

Przy założeniu prostokątnego okna widmo opisane wzorem (1) nazywamy ciągłym widmem chwilowym. Obliczone widmo, czyli  $U(f, n)$  jest okresową i ciągłą funkcją częstotliwości  $f$ . Jeśli  $u(i)$  jest znaną funkcją analityczną, to  $U(f, n)$  można niekiedy obliczyć bezpośrednio. Jednakże jeśli sygnał  $u(i)$  powstaje np. w wyniku pomiaru i nie można go aproksymować żadną znaną funkcją analityczną, to dla ciągłej zmiennej  $f$  widma tego obliczyć się nie da. Wówczas przeprowadza się dyskretną chwilową transformatę Fouriera [8, 13, 14].

### 3. Analiza chwilowa z wykorzystaniem wybranych metod rozpoznawania obrazów

Zaproponowany i zastosowany praktycznie ogólny schemat chwilowej analizy sygnałów jest następujący [5]:

1. wybiera się wielkość okna czasowego,
2. w przesuwającym się oknie czasowym oblicza się wybrane parametry sygnałowe (w ogólności można wziąć pod uwagę wiele takich parametrów, np. prążki FFT, parametry statystyczne, nieliniowe itp.),
3. dla danego położenia okna wartości parametrów reprezentują punkt w wielowymiarowej przestrzeni danych (tzw. przestrzeń parametrów),
4. dla danego skończonego sygnału w wyniku przesunięcia okna wzdłuż całego sygnału dysponuje się zbiorem punktów w wielowymiarowej przestrzeni parametrów,
5. dla porównania różnych sygnałów dokonuje się grupowania danych w przestrzeni parametrów i porównuje się środki uzyskanych grup.
6. wartości parametrów „w” dla kolejnych położenia przesuwającego się okna czasowego pokazują ewolucję w przestrzeni parametrów.

Grupowanie danych (zwane też analizą skupień) jest jedną z podstawowych technik rozpoznawania obrazów i polega na podziale zbioru danych na grupy elementów. Zwykle zakłada się z góry określoną liczbę grup „c” i próbuje się podzielić zbiór danych na c grup. Zaletą tej metody jest to, że odpowiedni algorytm automatycznie przeprowadza grupowanie danych na grupy elementów najbardziej do siebie podobnych (dla zdefiniowanej miary podobieństwa).

W artykule zastosowano jedynie klasyczny algorytm grupowania po c średnich (ang. c-means algorithm of clustering), który odpowiada optymalizacji funkcji celu w postaci [3, 7]

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c p_{ij} E_{ij} \quad (3)$$

gdzie energia  $E_{ij}$  jest zdefiniowana jako odległość Euklidesowa  $E_{ij} = |x_i - y_j|^2$  pomiędzy punktami danych  $x_i$  oraz środkami grup  $y_j$ , a prawdopodobieństwo (wartość przynależności)  $p_{ij}$ , które wiąże punkt danych  $x_i$  z grupą  $j$  wynosi

$$\forall_{ij} p_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \in j \\ 0 & \text{if } x_i \notin j \end{cases} \quad (4)$$

W przeprowadzonych doświadczeniach zastosowano jedynie algorytm grupowania danych po c średnich. Algorytm ten jest wprawdzie najpopularniejszy i najprostszy, ale równocześnie nie jest pozbawiony wad. Przede wszystkim jest on obciążony problemem lokalnych minimów, co powoduje, że często nie daje satysfakcjonujących rezultatów [3, 7]. Wydaje się, że w tym zakresie należałoby wykorzystać inne algorytmy grupowania danych np. algorytmy rozmyte (rozmyty algorytm grupowania po c-średnich) lub algorytmy posybilistyczne [3, 4].

### 4. Rezultaty badań

W przeprowadzonych badaniach metody chwilowe zastosowano do wykrywania zjawiska wypadania zapłonu w silniku wysokoprężnym lokomotywy spalinowej. Zjawisko wypadania zapłonów symulowano poprzez niedopuszczenie do procesu spalania w cylindrze 1 silnika poprzez zamknięcie dopływu paliwa do danego cylindra (odłączenie wtryskiwacza).

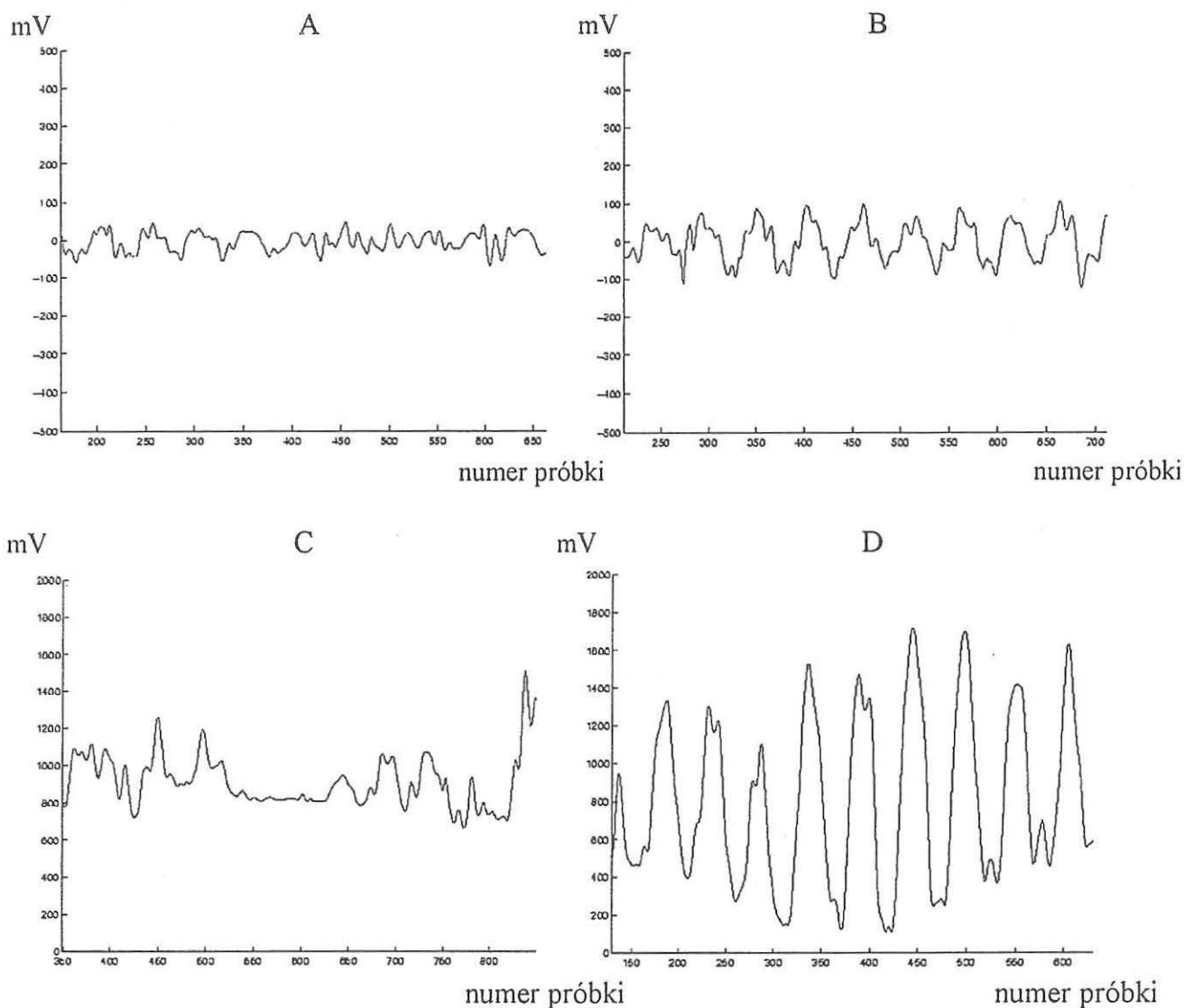
Czujnik przyspieszeń (akcelerometr) był umocowany na korpusie silnika w wybranym arbitralnie miejscu tak, aby dało się określić dokładnie kierunki pomiaru przyspieszenia. Do badań wykorzystany został 16-kanalowy rejestrator cyfrowy typu TA11 firmy Gould bazujący na czujniku piezoelektrycznym 4395 firmy Brüel & Kjær. Badań dokonano na lokomotywie 401Da – 427 z silnikiem 16H12A Henschel – 12V firmy Wola.

Badania objęły jedynie sygnały dla 1500 obr/min. Rozróżniono dwa podstawowe rodzaje tych sygnałów: prawidłowe (gdy wszystkie cylindry działają) i nieprawidłowe (gdy cylinder 1 ma odłączony wtryskiwacz). Częstotliwość próbkowania wynosiła 20 kHz. Szerokość okien wybrano jako 0.1 sekundy (2000 próbek) i 0.01 sekundy (200 próbek). W każdym z okien obliczono wartości siedmiu parametrów: linie widmowe FFT od 2 do 6, wartość średnią i wariancję. Rys. 1 pokazuje fragmenty wykresów przykładowych

sygnałów pozyskanych z silnika i odpowiednie wykresy zmienności drugiego prążka chwilowej FFT. Wartości chwilowe parametrów pokazane na rys. 1 wykazują dużą zmienność, co sugeruje przydatność tej metody do analizy chwilowych zmian w sygnale.

Ostatecznym rezultatem jest otrzymanie siedmiowymiarowej przestrzeni parametrów. W przestrzeni parametrów

dla znalezienia środków grup zastosowano algorytm grupowania po  $c$  średnich w najprostszym przypadku dla jednej grupy  $c=1$ . Wartości uśrednionych środków grup dla danych sygnałów są pokazane w tabeli 1. Wartości sygnałów i ich prążków widmowych (amplitud składowych harmonicznnych) oraz innych parametrów, jak wariancja lub wartość średnia, są podane w mV.



Rys. 1. Przykładowe fragmenty wykresów sygnałów dla 1500 obr/min i dla przypadku, gdy wszystkie cylindry pracują (A), gdy 1 cylinder nie pracuje (B) oraz fragmenty wykresów ich chwilowego widma Fouriera (2 prążek Fouriera) – odpowiednio (C) i (D) w oknie o szerokości 2000 próbek

Średnie współrzędne środków w 7-wymiarowej przestrzeni parametrów dla różnych typów sygnałów w mV

								Tabela 1	
	okno	1	2	3	4	5	6	7	
		Fourier 2	Fourier 3	Fourier 4	Fourier 5	Fourier 6	średnia	wariancja	
wszystkie cylindry pracują	0.1 s	628.93	526.62	550.79	660.96	513.13	3.50	365.10	
	0.01 s	428.42	652.82	1366.78	2854.60	1156.40	0.37	7.23	
cylinder 1 nie pracuje	0.1 s	552.87	537.14	819.78	703.86	460.463	-0.78	233.26	
	0.01 s	542.48	869.75	1656.60	3487.70	1876.68	-0.08	69.00	



## 5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę wielką złożoność i różnorodność możliwych schematów pomiarowych należy wyraźnie podkreślić, że dotychczasowe eksperymenty w zakresie widm chwilowych nie pozwalają jednoznacznie określić wartości tych metod. Wydaje się jednak, że dalsze badania w tym zakresie mogą się okazać interesujące.

Przyszłe eksperymenty w zakresie analizy chwilowej powinny wziąć pod uwagę większą ilość sygnałów, objąć większy zakres parametrów (statystyczne, korelacyjne, nieliniowe), rozważyć większy zakres wymiarów rozpatrywanej przestrzeni parametrów oraz zastosować bardziej nowoczesne i efektywne algorytmy grupowania danych, jak np. algorytm rozmyty lub posybilistyczny.

Uzyskane wyniki wskazują jednak na przydatność nieliniowej analizy sygnałów do diagnostyki silników wysokoprężnych na bazie sygnału wibroakustycznego. Analiza (tab. 1) pokazuje znaczące różnice pomiędzy środkami grup dla sygnałów prawidłowych i nieprawidłowych, co może się okazać znaczącym kryterium dla odróżnienia stanów prawidłowego i nieprawidłowego.

Dalsze badania w tym zakresie dają w perspektywie możliwość zastosowania metod analizy chwilowej w przyszłych systemach diagnostyki pokładowej zainstalowanych na lokomotywie spalinowej. Podejście do przetwarzania sygnałów bazujące na analizie chwilowej prowadzi do stosunkowo prostych metod obliczeniowych, łatwych do zaimplementowania na dowolnym komputerze, a w tym również na procesorze sygnałowym.

Największą zaletą metod przedstawionych w tym artykule jest ich chwilowość. Jedyne bowiem przy użyciu metod analizy chwilowej możliwe jest wykrycie chwilowych zmian w sygnale, takich jak np. pojedyncze przypadki wypadania zapłonu. Metody analizy chwilowej mogą wykorzystywać wszystkie znane metody przetwarzania sygnałów, w tym metody widmowe, metody sygnałów losowych, metody statystyczne oraz metody nieliniowe. Zaprezentowane w oddzielnym artykule z tej dziedziny metody nieliniowe są nowym podejściem do analizy sygnałów i mogą być wykorzystane z powodzeniem jako składowa metod chwilowych.

## Literatura

1. J. B. Allen, L. R. Rabiner. *A Unified Approach to Short-Time Fourier Analysis and Synthesis. Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, No. 11, 1977.
2. J. B. Allen. *Short Term Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform. IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-25, No. 3, June 1977.
3. J. C. Bezdek. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press, 1987. Second edition.*
4. P. Boguś, A. M. Massone, F. Masulli, A. Schenone. *Interactive graphical system for segmentation of multimodal medical volumes using fuzzy clustering. Machine GRAPHICS & VISION*, Vol. 7, No. 4, 1998.
5. P. Boguś, J. Merkisz, M. Waligórski. *Short-time methods of signal processing in combustion engine diagnostic – OBDII/EObD perspectives. Proceedings of 29<sup>th</sup> International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2003, September 14-17, 2003, Wista, Poland.*
6. C. K. Chui. *Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Processing. SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.*
7. R. Duda, P. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis. New York, Wiley Interscience, 1973.*
8. F. J. Harris. *On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, 1978.
9. Merkisz J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, Tom 1 i 2, 1998 i 1999.*
10. Merkisz J., Boguś P., Grzeszczyk G.: *Overview of engine misfire detection methods used in on-board diagnostics. Journal of KONES – Internal Combustion Engines*, Vol. 8, No. 1-2, 2001.
11. J. Merkisz, M. Waligórski, P. Boguś, R. Grzeszczyk. *Diagnostyka pokładowa zjawiska wypadania zapłonów w silnikach lokomotyw spalinowych. Pojazdy Szybowe Nr 4, 2002.*
12. J. Merkisz, M. Waligórski, P. Boguś. *Możliwości i warunki zastosowania systemów podobnych do OBD w silnikach lokomotyw spalinowych. Proceedings of 29<sup>th</sup> International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2003, September 14-17, 2003, Wista, Poland.*
13. S. K. Mitra, J. F. Kaiser (eds.): *Handbook for Digital Signal Processing. John Wiley & Sons, 1993.*
14. M. R. Portnoff. *Time-Frequency Representation of Digital Signals and Systems Based on Short-Time Fourier Analysis. IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-28, No. 1, February 1980.
15. UIC 623-1. *Homologacja silników spalinowych pojazdów napędnych. Wyd. 2. 1.07.1997.*
16. UIC 623-2. *Badania homologacyjne silników spalinowych pojazdów napędnych. Wyd. 2. 1.07.1997.*
17. UIC 623-3. *Badania seryjne i warunki odbioru silników spalinowych dieslowskich pojazdów trakcyjnych. Wyd. 1. 1.01.1989.*