

Dr hab. inż. Andrzej Puchalski, prof. UTH¹

Dr hab. inż. Marcin Ślęzak, prof. ITS²

Dr hab. inż. Iwona Komorska, prof. UTH¹

Mgr inż. Piotr Wiśniowski²

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu
ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Polska

² Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Polska

E-mail: andrzej.puchalski@uthrad.pl

E-mail: marcin.slezak@its.waw.pl

E-mail: iwona.komorska@uthrad.pl

E-mail: piotr.wisniowski@its.waw.pl

Multifraktalna analiza eksploatacyjnego profilu prędkości pojazdu w zastosowaniu do testów jezdnych

Multifractal analysis vehicle's in-use speed profile for application in driving cycles

Słowa kluczowe: *analiza multifraktalna, testy jezdne, rzeczywiste warunki drogowe*

Streszczenie: Sygnały czasowe rejestrowane przez system diagnostyki pokładowej OBD i opisujące sposób ruchu pojazdu w rzeczywistych warunkach drogowych, wykazują niestacjonarność i nieliniowość oraz statystyczną wieloskalowość. W praktyce oznacza to, że analiza zarejestrowanych szeregów czasowych wymaga modelowania zjawisk nieliniowych. Celem niniejszej pracy było zbadanie charakteru profilu prędkości pojazdów w rzeczywistych warunkach drogowych metodą analizy multifraktalnej. Szereg badań wskazuje, że stosowane przez wiele lat testy jezdne nie były reprezentatywne dla rzeczywistych warunków eksploatacyjnych pojazdów. Zarówno dla nowego cyklu jezdnych WLTC, światowej zharmonizowanej procedury badań pojazdów lekkich jak i w rzeczywistych warunkach drogowych jazdy miejskiej na trasie pomiarowej, będącej przedmiotem badań doświadczalnych uzyskano potwierdzenie silnych własności multifraktalnych rejestrowanych szeregów czasowych prędkości pojazdu.

1. Wprowadzenie

Badania użytkowych właściwości samochodowych układów napędowych znajdują zastosowanie w fazie opracowywania koncepcji (podstawowe badania poznawcze), w fazie projektowania (w ramach badań prototypowych), w fazie produkcji (podczas kontroli jakości), na etapie dopuszczania do ruchu (badania homologacyjne) oraz w fazie eksploatacji (badania diagnostyczne). Cel ten jest realizowany w różnego rodzaju testach hamownianych, które różnią się narzucanymi warunkami pracy. W prezentowanej pracy podjęto problem analizy eksploatacyjnego profilu prędkości pojazdu w zastosowaniu do testów jezdnych. Cykl jezdny pojazdów (VDC- Vehicle Driving Cycle) to szereg czasowy danych reprezentujących prędkość

pojazdu, który ma odzwierciedlać ruch pojazdu w rzeczywistych warunkach drogowych i służyć ocenie ekonomicznej i emisyjnej pojazdu lub silnika.

Wieloletnie badania doprowadziły do kilkuset praktycznych cykli jezdnych w różnych krajach i regionach. Większość stosowanych obecnie testów służących do wyznaczania emisji z pojazdów samochodowych jest opracowanych zgodnie z zasadą wiernej symulacji w dziedzinie czasu. Najbardziej popularne to testy takie jak FTP-75 (Federal Test Procedure), NEDC (New European Driving Cycle), czy JC08 (Japanese cycle). NEDC jest używany w Europie, cykl FTP 75 jest używany w Stanach Zjednoczonych a JC08 w Japonii. NEDC to cykl syntetyczny teoretycznego profilu jazdy, podczas gdy pozostałe dwa pochodzą z rzeczywistych danych dotyczących użytkownika [3, 9].

Bardziej miarodajne wyniki spalania w trakcie symulacji warunków eksploatacji pojazdu na hamowni, ma zapewnić test WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle) będący rezultatem światowej zharmonizowanej procedury badań pojazdów lekkich. Cykl bazuje na rzeczywistych profilach jazdy pochodzących z badań statystycznych [18].

Każda metodyka tworzenia testów jezdnych wymaga analizy natury rejestrowanych sygnałów eksploatacyjnych prędkości pojazdu. Większość rzeczywistych sygnałów czasowych, w tym także szeregi czasowe rejestrowane przez system diagnostyki pokładowej OBD i opisujące sposób ruchu pojazdu w rzeczywistych warunkach drogowych, wykazuje niestacjonarność i nieliniowość oraz statystyczną wieloskalowość. W praktyce oznacza to, że analiza zarejestrowanych szeregów czasowych wymaga stosowania metod analizy nieliniowej [1, 7]. Metody formalizmu multifraktalnego, wykorzystujące lokalne miary o charakterze potęgowym, takie jak wykładniki Holdera regularności sygnału czy wskaźniki probabilistyczne, są dobrym sposobem modelowania dynamiki takich układów [5, 8].

Wykładnik osobliwości Holdera wyznaczony w każdym punkcie, gdzie funkcja jest zdefiniowana, odzwierciedla poziom fluktuacji amplitudy w sąsiedztwie tego punktu. Czynniki skalujące funkcji rozdziału miary probabilistycznej bazującej na wartościach amplitudy sygnału, pozwala na segmentację uwzględniającą poziom entropii. Rozkład statystyczny reprezentowany przez histogram wykładników osobliwości stanowi graficzny obraz multifraktalności sygnału. Istnieją dwa sposoby wyznaczania widma multifraktalnego wykładników osobliwości. Metoda bezpośrednia polega na aproksymacji histogramu dla wyznaczonych wykładników Holdera. Metoda pośrednia, w której za wymiar fraktalny przyjmuje się zwykle wymiar pojemnościowy krzywej będącej wykresem rozważanego sygnału, bazuje na algorytmie analizy fluktuacji detrendowanych szeregu czasowego [6].

W artykule przedstawiono następujące zagadnienia. Rozdział 2 sygnalizuje ideę zastosowanej metody analizy multifraktalnej. Wyniki tej analizy w odniesieniu do cyklu jezdny WLTC zharmonizowanej procedury badań pojazdów lekkich przedstawiono w rozdziale 3. Przeprowadzone badania w rzeczywistych warunkach drogowych jazdy miejskiej omówiono w rozdziale 4. Rozdział 5 stanowi podsumowanie.

2. Formalizm multifraktalny a miara regularności szeregu czasowego

Formalizm multifraktalny znalazł szereg zastosowań w analizie rzeczywistych sygnałów, a w szczególności w eksploatacyjnych badaniach diagnostycznych pojazdów samochodowych [4,11-17]. Prowadzone badania wskazują na różne procedury identyfikacji multifraktalnego charakteru rzeczywistych szeregów czasowych.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano podejście bazujące na wykładnikach osobliwości sygnałów i widmie multifraktalnym. Punktowym wykładnikiem osobliwości Holdera funkcji $f(x)$ w punkcie x_0 nazywamy liczbę h zdefiniowaną jako kres górny wszystkich wykładników spełniających, dla pewnego $C>0$, warunek:

$$|f(x) - P_n(x - x_0)| \leq C|x - x_0|^h \quad (1)$$

gdzie $P_n(x - x_0)$ jest wielomianem stopnia $n < h$. Z zależności tej wynika, że wykładnik $h > 1$ opisuje regularność funkcji dokładniej niż jej kolejne pochodne. Jeżeli reprezentacją sygnału jest szereg czasowy $f_i, i = 1, 2, \dots, N$, to:

$$f_{i+\Delta i} - f_i \sim |\Delta i|^{h(i)} \quad (2)$$

gdzie $h(i)$ jest wykładnikiem osobliwości szeregu w punkcie i .

Zbiór wymiarów fraktalnych każdego podzbioru elementów szeregu czasowego f_i o tym samym wykładniku Holdera h tworzy multifraktalne widmo osobliwości. Do wyznaczenia widma wykładników Holdera sygnałów prędkości pojazdu rejestrowanych przez system OBD wykorzystano multifraktalną wersję analizy fluktuacji detrendowanych (MF-DFA) bazującą na eliminacji trendu z badanego szeregu czasowego. Procedura prowadzi do wyznaczenia miary w postaci funkcji fluktuacyjnej rzędu q , wykazującej charakter potęgowej:

$$F_q(s) \sim s^{H(q)} \quad (3)$$

gdzie $H(q)$ jest uogólnionym wykładnikiem Hursta, a parametr q pozwala zdekomponować miarę ze względu na jej wartość. Przekształcenie Legendre'a uogólnionego wykładnika wielkoskalowego $\tau(q) = qH(q) - 1$, pozwala na uzyskanie widma multifraktalnego:

$$f(h) = qh - \tau(q) \quad (4)$$

gdzie $h = \frac{d}{dq} \tau(q)$, to wykładnik osobliwości Holdera.

Widmo multifraktalne stanowi histogram wykładników odzwierciedlających poziom fluktuacji amplitudy sygnału. Ponadto paralelizm formalizmu multifraktalnego i termodynamiki statystycznej wskazuje, że wykładnik osobliwości Holdera i widmo multifraktalne można interpretować odpowiednio jako energię i entropię badanego procesu.

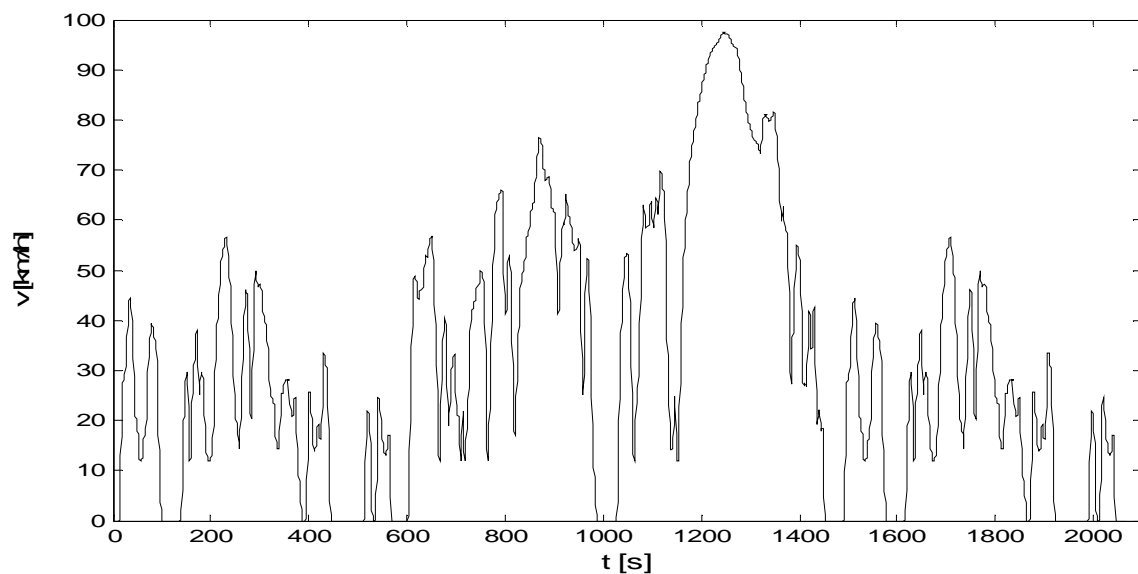
Opis własności dynamicznych układu na podstawie widma multifraktalnego szeregu czasowego umożliwiają:

- poziom multifraktalności $\Delta = h_{max} - h_{min}$ określony przez osobliwości o największej i najmniejszej fluktuacji szeregu czasowego (obserwowanego sygnału h_{min} i h_{max} ,
- osobliwość o największym wymiarze, czyli najczęściej spotykanej osobliwości szeregu czasowego $\{h_0: f(h_0) = \max f(h)\}$,
- rozpiętość wymiarów podzbiorów osobliwości $\Delta f = f(h_{max}) - f(h_{min})$.

3. Badania symulacyjne testu WLTC

Szereg badań potwierdziło, że stosowane przez wiele lat testy jezdne nie są reprezentatywne dla rzeczywistych warunków eksploatacyjnych pojazdów. W związku z tym emisja i zużycie paliwa w pojazdach są niedoszacowane. Dążąc do bardziej dynamicznego zharmonizowanego cyklu testowego, opracowano nowy ogólnoświatowy cykl jezdny WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle). Syntezy dokonano na podstawie danych dotyczących parametrów ruchu w Europie, Indiach, Japonii, Korei i USA, uwzględniając

sytuacje związane z jazdą w ruchu miejskim, pozamiejskim i na autostradach. W porównaniu do NEDC, cykl testowania jest dłuższy, znacznie bardziej dynamiczny, ma dużo więcej cykli przyspieszania i hamowania, krótsze postoje oraz wyższą wartość prędkości średniej i maksymalnej. Ze względu na wprowadzone zmiany, cykl jezdny WLTC zapewni znacznie dokładniejsze warunki do obliczania zużycia paliwa i emisji spalin [10]. Jego pierwsze zastosowanie ma dotyczyć modeli pojazdów wprowadzone na rynek po raz pierwszy od września 2017 roku. Cykl jezdny WLTC został podzielony na cztery części, odpowiadające różnym prędkościom jazdy: niskiej, średniej, wysokiej i bardzo wysokiej. Jeżeli prędkość maksymalna nie przekracza 135km/godz., to część bardzo wysokiej prędkości należy zastąpić częścią prędkości niskiej. Przebieg czasowy cyklu WLTC, dla samochodów klasy 3b, ze stosunkiem mocy do masy $PWR > 34$, pokazano na rys.1, a jego podstawowe parametry w tabeli 1. Dynamika jazdy jest w przypadku tych pojazdów zdeterminowana przez zachowania kierowcy i intensywność ruchu drogowego, a nie przez parametry techniczne samochodu.



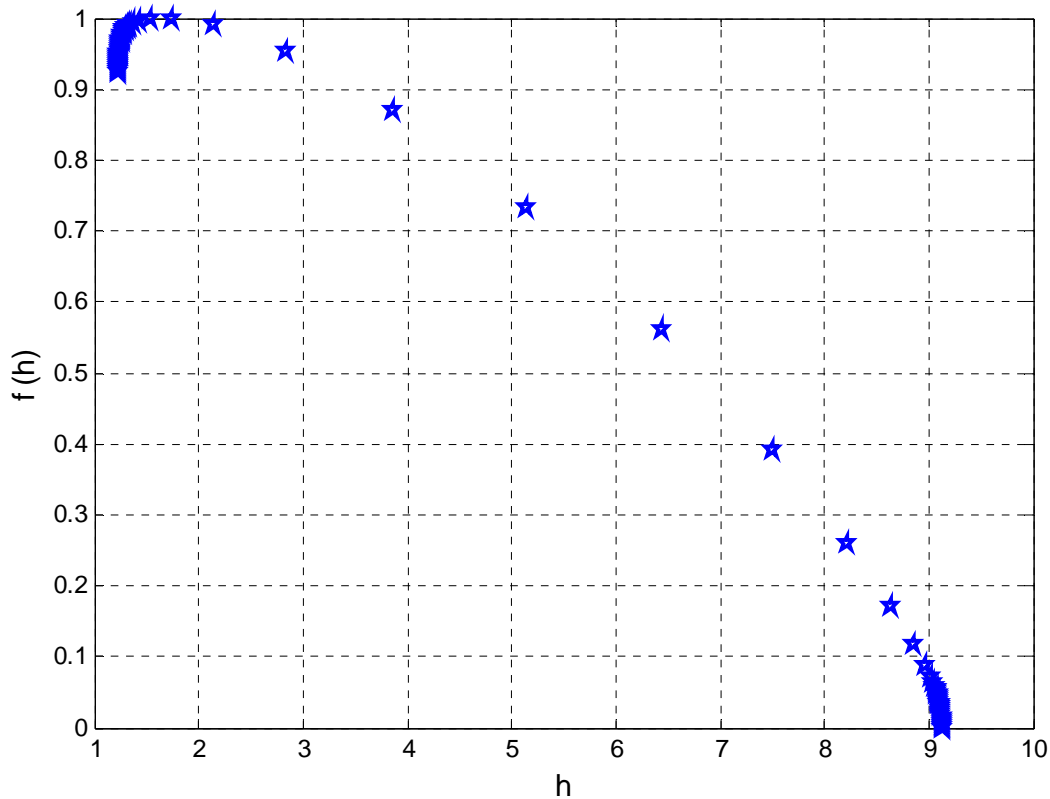
Rys.1. Cykl jezdny WLTC

Phase	Duration	Stop duration	Distance	p_stop	v_max	a_min	a_max
	s	s	m		km/h	m/s ²	m/s ²
Low	589	156	3095	26,5%	56,5	-1,47	1,47
Medium	433	48	4756	11,1%	76,6	-1,49	1,57
High	455	31	7162	6,6%	97,4	-1,49	1,58
Extra-High	323	7	8254	2,2%	131,3	-1,21	1,03
Total	1800	242	23266				

Tabela 1. Podstawowe parametry testu jezdnego WLTC dla klasy 3b

Widma osobliwości dla badanego testu jezdnego WLTC pokazane na rys.2, potwierdzają jego multifraktną naturę. Poziom multifraktności wynosi : $\Delta = 7,92$,

natomiast rozpiętość wymiarów segmentów o najwyższym i najniższym prawdopodobieństwie $\Delta f = 0,92$. Najczęściej spotykane wykładniki osobliwości dotyczą tych fragmentów zarejestrowanych szeregów czasowych, które opisuje największa zmienność. Najmniejsze prawdopodobieństwo rejestracji wykazują zaś okresy jazdy o najwyższej regularności. Większość punktów koncentruje się wokół wymiarów odpowiadających osobliwościom o największej i najmniejszej fluktuacji szeregu czasowego prędkości pojazdu.



Rys.2. Widmo osobliwości dla testu jezdni WLTC

4. Badania i analiza danych doświadczalnych

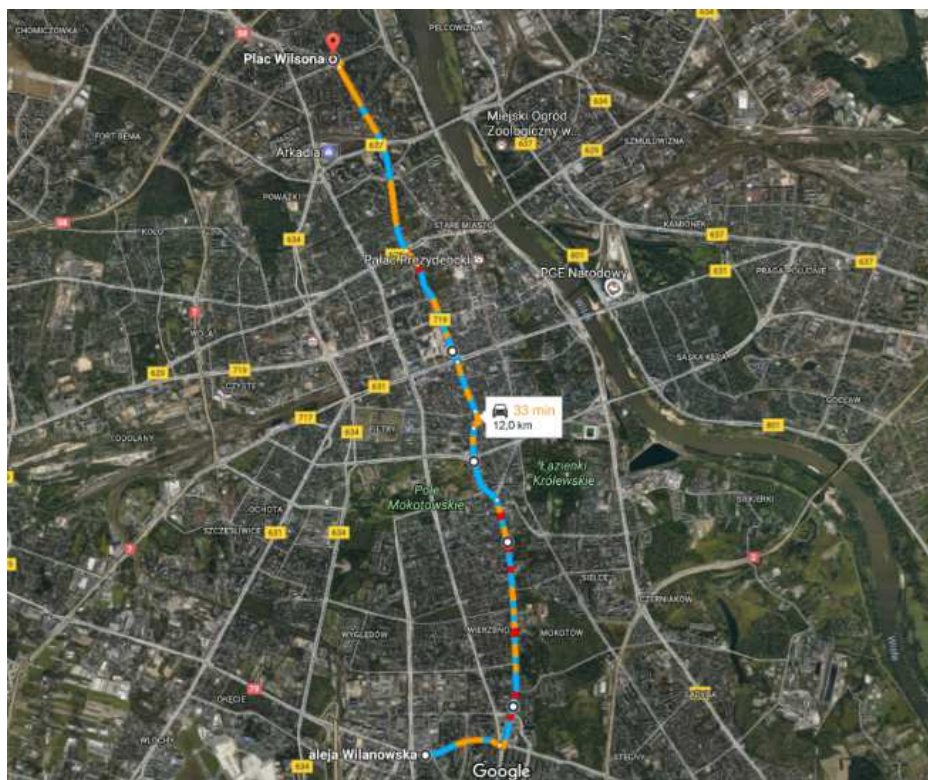
W artykule przedstawiono wyniki badań ruchu pojazdów w rzeczywistych warunkach drogowych reprezentowanych przez jazdę miejską w dużej aglomeracji, w godzinach 9-13 przez pięć dni roboczych. Przeprowadzona analiza bazowała na szeregach czasowych prędkości pojazdu o okresie próbkowania równym 1s.

Wykorzystane urządzenie pomiarowe, widoczne na rys. 3 posiada możliwość próbkowania prędkości co 1 sekundę. Zakres prędkości możliwych do rejestracji to 0 -255 km/h, z rozdzielczością 1 km/h a maksymalny możliwy do zapisania dystans badania to 16 000 km. Urządzenie posiada możliwość rejestracji także szeregu innych parametrów pracy, jak obroty silnika, przyspieszenie pojazdu, ciśnienie w kolektorze dolotowym, czy położenie przepustnicy i umożliwia komunikację ze sterownikiem silnika z wykorzystaniem następujących protokołów łączności: J1850-41.6, J1850-10.4, ISO9141, KWP2000 (ISO 14230), CAN (Control Area Network ISO 11898).



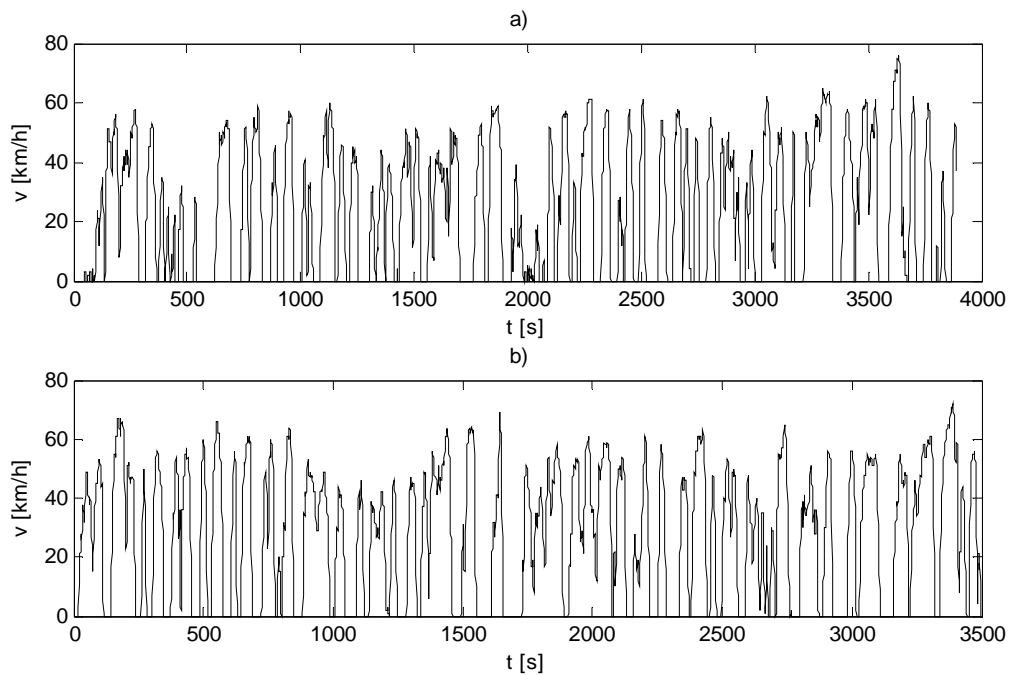
Rys. 3. Urządzenie rejestrujące CarChip Pro w gnieździe OBD pojazdu

Trasa pomiarowa obejmowała odcinek o długości 12 km i przebiegała pomiędzy Placem Wilsona a Galerią Mokotów w Warszawie. Mapę prezentującą trasę pomiarową, opracowaną z wykorzystaniem map Google, przedstawiono na rys. 4.



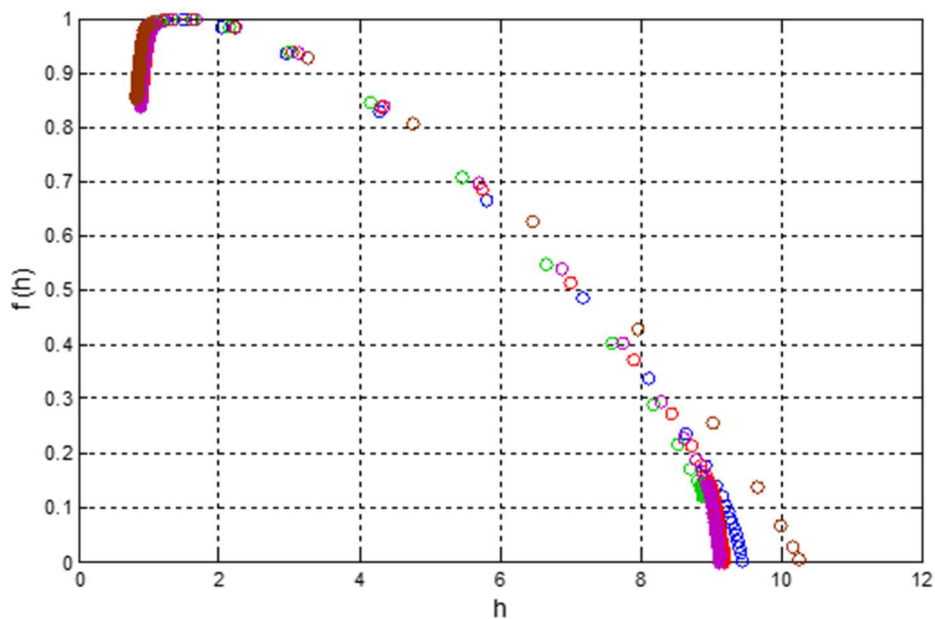
Rys. 4. Mapa prezentująca trasę pomiarową

Przykładowe przebiegi prędkości rejestrowane w ciągu jednego dnia dla jazdy w obie strony pokazano na rys. 5. Przeprowadzona analiza bazowała na szeregach czasowych prędkości pojazdu o okresie próbkowania równym 1s.

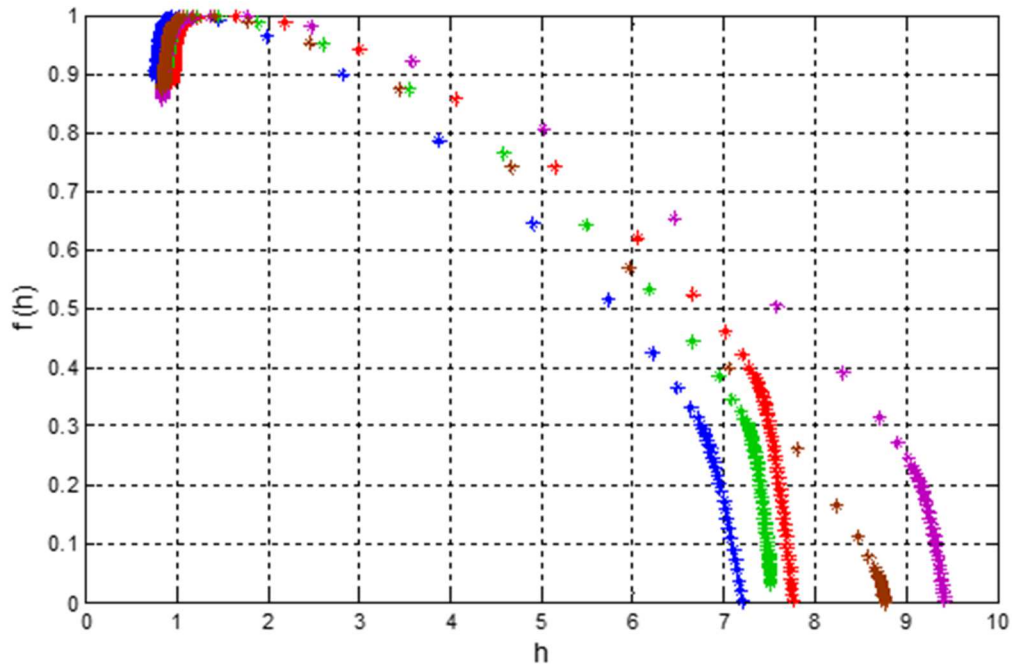


Rys. 5. Przykładowe przebiegi prędkości pojazdu

Widma multifraktalne pokazane na rys.6 - rys.7 są odzwierciedleniem dekompozycji rzeczywistego szeregu czasowego prędkości pojazdu za względu na częstość występowania fragmentów o określonej dynamice zmienności.



Rys. 6. Widma multifraktalne sygnałów prędkości pojazdu przy jeździe z punktu A do B



Rys.7. Widma multifraktalne sygnałów prędkości pojazdu przy jeździe z punktu B do A

Wszystkie spectra mają podobne własności w ramach przejazdu daną trasą w kolejne pięć dni roboczych. Wykazują zbliżone wartości poziomów multifraktalności, osobliwości o największym wymiarze i rozpiętości wymiarów podzbiorów osobliwości.

Segmenty zarejestrowanych sygnałów prędkości wykazujące największe fluktuacje osiągają wymiary $f(h) > 0.8$. Najmniejsze prawdopodobieństwo obecności wykazują okresy jazdy o regularności opisanej wykładnikiem osobliwości $h > 7$. Poziom multifraktalności Δ w zależności od dnia tygodnia, osiąga wartości w zakresie od 7 do 9.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza potwierdziła multifraktalny charakter fluktuacji prędkości pojazdu zarówno w ramach cyklu jezdnego WLTC światowej zharmonizowanej procedury badań pojazdów lekkich jak i w rzeczywistych warunkach drogowych jazdy miejskiej na tracie pomiarowej, będącej przedmiotem badań doświadczalnych w Warszawie. Widma multifraktalne charakteryzuje podobny kształt oraz zbliżone wartości poziomu multifraktalności. Niesymetryczny przebieg widm wskazuje na własności analogiczne dla multifraktali uzyskiwanych w wyniku realizacji uogólnionego procesu dwumianowej kaskady multiplikatywnej [2]. Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość wykorzystania procesu kaskady multiplikatywnej do syntezy rzeczywistych warunków eksploatacyjnych oraz krótkookresowego prognozowania stanu ruchu drogowego, co stanowi krytyczny aspekt w rozwoju inteligentnych systemów transportowych. Krok ten wymaga prowadzenia dalszych badań obejmujących jazdę w warunkach pozamiejskich oraz na autostradzie.

Literatura

1. Batko W, Dąbrowski Z, Kiciński J. *Nonlinear Effects In Technical Diagnostics*. Radom, Poland: Institute for Sustainable Technologies, 2008.
2. Cheng Q. Generalized binomial multiplicative cascade processes and asymmetrical multifractal distributions. *Nonlinear Processes in Geophysics* 2014; 21: 477-487.
3. Chłopek Z. Synteza testów jezdnych zgodnie z kryteriami podobieństwa charakterystyk częstotliwościowych. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18(4): 572-577.
4. Dai M, Zhang Ch, Zhang D. Multifractal and singularity analysis of highway volume data. *Physica A* 2014; 407: 332-340.
5. Kantelhardt JW. *Fractal and Multifractal Time Series*. Mathematics of Complexity and Dynamical Systems Robert A Meyers (Ed.). New York: Springer 2011.
6. Kantelhardt JW, Zschiegner SA, Koscielny-Bunde E, Havlin S, Bunde A, Stanley HE. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A* 2002; 316: 87-114.
7. Kantz H, Schreiber T. *Nonlinear time series analysis*. Cambridge: University Press, 2004.
8. Loutridis SJ. An algorithm for the characterization of time-series based on local regularity. *Physica A* 2007; 381: 383–398.
9. Merkisz J, Lijewski P, Fuc P, Siedlecki M, Ziółkowski A. Development of the methodology of exhaust emissions measurement under RDE (Real Driving Emissions) conditions for non-road mobile machinery (NRMM) vehicles. *KONMOT* 2016; *Materials Science and Engineering* 148: 1-11.
10. Mock P, Kühlwein J, Tietge U, Franco V, Bandivadekar A, German J. The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU. Working paper 2014-9. International Council on Clean Transportation, 2014.
11. Puchalski A, Komorska I. Stable Distributions and Fractal Diagnostic Models of Vibration Signals of Rotating Systems. *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations*. Applied Condition Monitoring A. Timofiejczuk et al. (eds.) Springer International Publishing AG 2018; 9: 91-101.
12. Puchalski A. Multiscale analysis of vibration signals in engine valve system. *Journal of Vibroengineering* 2015; 17(7): 3586-3593.
13. Puchalski A. Techniki budowy nieliniowych modeli diagnostycznych z wykorzystaniem szeregów czasowych drgań mechanicznych. *Przegląd Mechaniczny* 2016; 10: 33-36.
14. Puchalski A, Komorska I. Multifractal Nature of Diesel Engine Rattle Noise in Vehicle. *Archives of Acoustics* 2017; 42(3): 469-474.
15. Shang P, Lu Y, Kamae S. The application of Holder exponent to traffic congestion warning. *Physica A* 2006; 370: 769–776.
16. Shang P, Lu Y, Kamae S. Detecting long-range correlation of traffic time series with multifractal detrended fluctuation analysis. *Chaos, Solitons and Fractals* 2008; 36: 82-90.
17. Shang P, Shen J. Multi-fractal analysis of highway traffic data *Chinese Physics* 2007; 16(2): 365-373.
18. Sileghem L, Bosteels D, May J, Favre C, Verhelst S. Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. *Transportation Research Part D* 2014; 32: 70–85.