

**dr inż. Marcin Łukasiewicz****Zakład Pojazdów i Diagnostyki****Wydział Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszcy**

## **Estymatory sygnału drganiowego w ocenie stanu technicznego silników spalinowych**

### **Wprowadzenie**

Chcąc w pełni skorzystać z informacji o stanie technicznym maszyny zawartych w emitowanych procesach wyjściowych, należy najpierw zapoznać się z mechanizmem ich generacji oraz z ich charakterem. Podczas funkcjonowania maszyn, na skutek istnienia szeregu czynników zewnętrznych (wymuszenia środowiska, od innych maszyn) oraz wewnętrznych (starzenie, zużycia, współpraca elementów) w maszynie następują zaburzenia stanów równowagi, które rozchodzą się w ośrodku sprężystym - materiale, z którego zbudowana jest maszyna. Konieczność oceny stanu technicznego jest uwarunkowana potrzebą podejmowania decyzji związanych z eksploatacją danego obiektu oraz sposobem dalszego postępowania z obiektem. Współczesny rozwój automatyzacji i informatyki w zakresie sprzętu i oprogramowania stwarza nowe możliwości realizacji systemów diagnozowania i monitorowania stanu technicznego coraz bardziej złożonych konstrukcji mechanicznych. Te nowe możliwości są związane z nowymi konstrukcjami inteligentnych czujników, modułowego oprogramowania oraz modułów komunikacji i wymiany danych. [6,7]

### **1. Model generacji sygnału drganiowego obiektów mechanicznych**

Wyodrębniając w analizie stanu dynamicznego obiektu mechanicznego procesy wejściowe, strukturę oraz procesy wyjściowe, należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, iż posiadają one losowy charakter. Bogactwo wystąpienia losowości oraz możliwych zakłóceń stanowi przyczynę do określenia dodatkowych założeń, dotyczących wejść oraz zachodzących transformacji stanów obiektu mechanicznego. W wyniku istnienia wejścia i realizacji transformacji stanów odzwierciedlających procesy zachodzące w obiekcie, powstaje szereg dających się mierzyć objawów charakterystycznych, zawartych w procesach wyjściowych z maszyny. Procesy te są podstawą do budowy modelu generacji sygnałów, determinującego sposób budowy, funkcjonowania i zmian stanów diagnozowanego obiektu



technicznego lub maszyny. Cechy modelu generacji sygnałów diagnostycznych dla maszyn o stacjonarnym ruchu okresowym  $T$  i losowych zakłóceniach to [1,5,6]:

1. Stan maszyny jest określony jednoznacznie przez sygnał charakterystyczny  $\varphi_i(t, \Theta)$ ,  $0 \leq t \leq T$ ,  $0 \leq \Theta \leq \Theta_{aw}$ , ( $T$  – okres,  $\Theta_{aw}$  czas do awarii) generowany oddzielnie przy każdym obrocie. Sygnał ten ulega zmianom w czasie dynamicznym „ $t$ ” oraz ewolucji w czasie wolnym „ $\Theta$ ”.
2. Sygnał charakterystyczny jest złożony z procesu zdeterminowanego  $\varphi_0$  i przypadkowego „ $n$ ”, zaś jego intensywność i dynamika zmian charakteryzują stan maszyny. Tak więc podczas  $i$ -tego obrotu jest wygenerowany sygnał:

$$\varphi_i(t, \Theta) = \varphi_0(t, \Theta) + n_i(t, \Theta), \quad t \in (\Theta, T) \quad (1)$$

3. Ruch obrotowy maszyny (okresowy) przekształca sygnał charakterystyczny przez tzw. transformację kinematyczną na sygnał  $x(t, \Theta)$ . W pierwszym przybliżeniu transformację tę można rozumieć jako  $T$  – okresowe powtarzanie sygnału okresowego, według zależności:

$$x(t, \Theta) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(t - iT, \Theta) u(t - iT) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(t, \Theta) * \delta(t - iT) \quad (2)$$

gdzie:  $u(q) = \begin{cases} 0, & q \leq 0 \\ 1, & q > 0 \end{cases}$ , zaś gwiazdka  $*$  oznacza operację splotu oraz  $\delta(t - iT)$  okresową

dystrybucję Diraca.

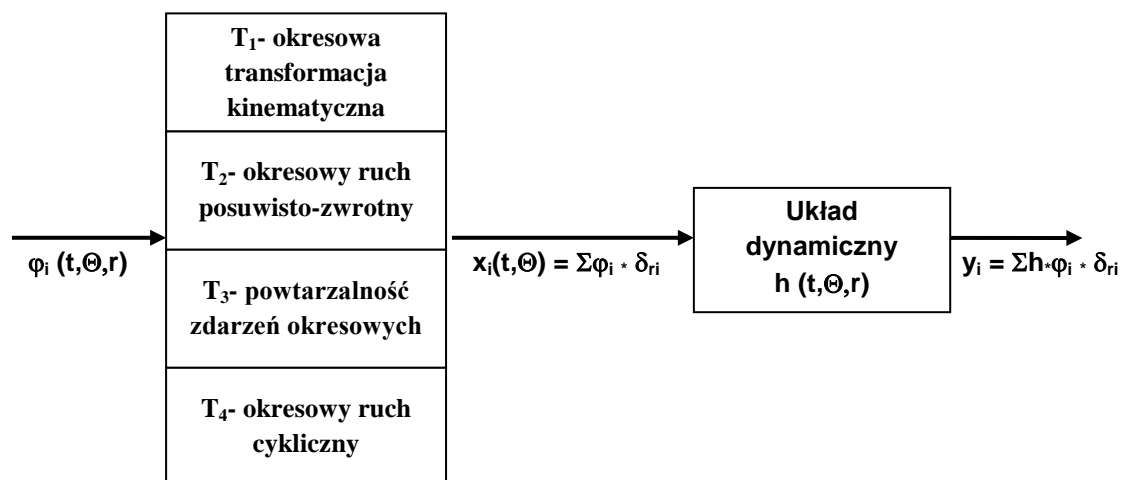
4. Przekształcony sygnał charakterystyczny będący odwzorowaniem oddziaływań dynamicznych jest odbierany jako  $y(t, \Theta)$  i w najprostszym przypadku jest odpowiedzią układu dynamicznego o charakterystyce impulsowej  $h(t, \Theta)$  na wymuszenie  $x(t, \Theta)$ . Uwzględniając rozległość przestrzenną „ $r$ ” maszyny można napisać:

$$y(t, \Theta, r) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(t, \Theta, r) * (h(t, \Theta, r) * \delta(t - iT)) \quad (3)$$

5. Procesy wyjściowe maszyny (selektywnie) wpływają zwrotnie na procesy zużyciowe i w dalszym ciągu na stan eksploatacyjny maszyny przez dodatnie, destrukcyjne sprzężenie zwrotne, zniekształcając sygnał  $\varphi_i(t, \Theta)$ .
6. Dla ustalonej wartości czasu eksploatacji  $\Theta = \text{const}$  wszystkie obiekty dynamiczne traktowane są jako liniowe, stacjonarne układy, których własności opisuje jednoznacznie odpowiedź impulsowa  $h(t, \theta, r)$  albo jej transformaty: operatorowa Laplace’a  $H(p, \Theta)$  lub widmowa Fouriera  $H(j\omega, \Theta)$ . [6,7]



Opierając się na ogólnym modelu generacji sygnału w maszynach o ruchu obrotowym został zaproponowany model transformacji sygnału charakterystycznego  $\varphi_i$  w sygnał diagnostyczny  $y_i$  w zastosowaniu dla silników spalinowych.

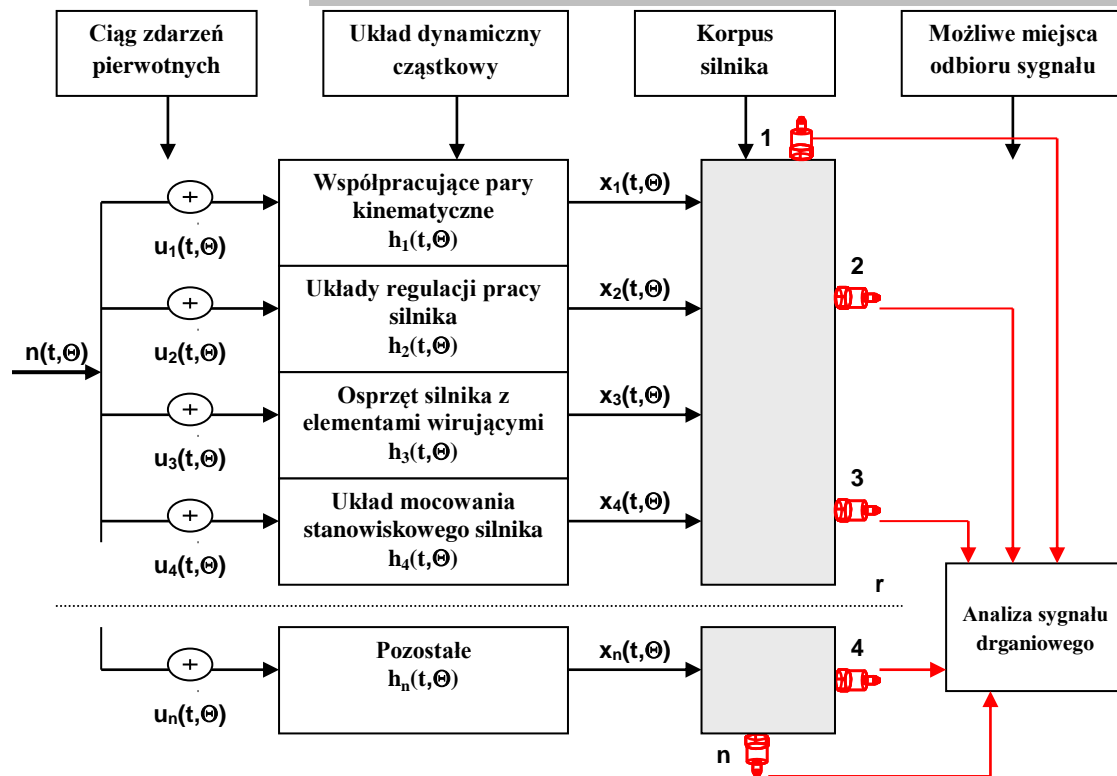


Rys. 1. Model transformacji sygnału charakterystycznego  $\varphi_i$  w sygnał diagnostyczny  $y_i$  w zastosowaniu dla silników spalinowych [1,3,5,6]

Sygnał pierwotny  $\varphi_i(t, \theta, r)$  jest pierwotnym  $i$ -tym zdarzeniem elementarnym, którego postać determinuje konstrukcja i stan eksploatacyjny silnika. Dzięki  $T_1$  – okresowej transformacji kinematycznej,  $T_2$  – okresowym ruchom posuwisto – zwrotnym,  $T_3$  – powtarzalności zdarzeń okresowych i  $T_4$  – okresowym ruchom cyklicznym, jest on przekształcony w ciąg zdarzeń elementarnych opisanych jako sygnał  $x_i(t, \theta, r)$ . Ten proces dynamiczny przechodząc przez strukturę silnika daje w efekcie w punkcie odbioru sygnału nowy ciąg zdarzeń, przekształcony na własnościach przestrzennych, który jest nowym sygnałem diagnostycznym  $S(\theta, r)$ . Na podstawie tak stworzonego modelu transformacji sygnału charakterystycznego  $\varphi$  w sygnał diagnostyczny  $y$  w zastosowaniu dla silników spalinowych zaproponowano model generacji sygnału diagnostycznego silnika spalinowego z uwzględnieniem prowadzenia badań wibroakustycznych. Schemat takiego rozwiązania generacji sygnału diagnostycznego przedstawiono na rysunku 2. Ze względu na złożoność procesów zachodzących w silniku mamy dużą ilość ciągów zdarzeń elementarnych, które mają wpływ na wyniki prowadzonych badań. [3,6,7]



## Logistyka - nauka



Rys. 2. Model generacji sygnału diagnostycznego silnika spalinowego [3]

Odbierane sygnały wyjściowe w dowolnym miejscu korpusu silnika są sumą odpowiedzi na wszystkie zdarzenia elementarne  $u_n(t, \Theta)$ , występujące w poszczególnych układach dynamicznych cząstkowych o impulsowej funkcji przejścia  $h_n(t, \Theta)$ . Oddziaływania te po przejściu przez właściwe układy dynamiczne sumują się na korpusie silnika, na którym w wybranych punktach umieszczamy przetworniki drgań. Z przetworników drgań sygnał kierowany jest do systemu analizy sygnału drganiowego, w którym za pomocą aplikacji inżynierskich dokonujemy wyznaczenia estymatorów tego sygnału. Przez  $n(t, \Theta)$  oznaczono tutaj przypadkowe oddziaływanie występujące w modelu z tytułu obecności mikrozwłask dynamicznych takich jak tarcie inne tego typu zjawiska. [3,6,7]

Do opisu sygnałów drganiowych emitowanych przez maszyny lub ich otoczenie, wyodrębnia się ich przebieg w postaci funkcji  $x(t)$  przyjmującej wartości rzeczywiste. Rejestracja takiej funkcji podczas badań a następnie jej analiza pozwala dla skończonego przebiegu czasu wyznaczyć cechy sygnału, które są zawsze pewnymi przybliżeniami rzeczywistych wartości. Jeśli funkcja czasowa sygnału  $x(t)$  jest określona dla przedziału czasu  $T$ , lub jest periodyczna, to funkcję  $x(t)$  możemy przedstawić w postaci szeregu Fouriera [1,3,5,6,7]:

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t + \varphi_n\right) \quad (4)$$



Szereg Fouriera jest sumą przebiegów sinusoidalnych o częstotliwościach równych kolejnym wielokrotnościom częstotliwości podstawowej  $f_0 = 1/T$ . Amplitudy  $a_n$  tworzą dyskretne widmo amplitud sygnału. W praktycznych badaniach maszyn drgania złożone możemy rozpatrywać jako sumę skończonej lub nieskończonej liczby drgań prostych.

## 2. Aplikacja inżynierska „Symptomy”

Celem badań diagnostycznych jest określenie stanu maszyny (procesu) w chwili uznanej za ważną, przez porównanie fizycznego stanu rzeczywistego (chwilowego) ze stanem wzorcowym. Każdy stan maszyny może być wyrażony przez zbiór wartości liczbowych charakteryzujących jego strukturę oraz intensywność procesów zachodzących podczas funkcjonowania maszyny. Stan maszyny jest więc określany zbiorem wartości liczbowych zmiennych fizycznych opisujących maszynę w chwili badania diagnostycznego. [6,7]

W oparciu o środowisko Matlab opracowano dla potrzeb analizy procesów drganiowych w Zakładzie Pojazdów i Diagnostyki aplikację „Symptomy”, służącą do przetwarzania i analizy danych doświadczalnych. Program umożliwia przetworzenie sygnału drganiowego z postaci amplitudy drgań przebiegu czasowego do wybranych trzydziestu dziewięciu estymatorów procesu drganiowego danego obiektu technicznego. Uzyskane w ten sposób wartości liczbowe estymatorów tworzą macierz obserwacji dla danego stanu technicznego silnika w chwili wykonania badań diagnostycznych. W badaniach stanu technicznego silników spalinowych w oparciu o metody wibroakustyczne tak duża ilość estymatorów sygnału drganiowego może powodować problemy z właściwą ich interpretacją pod kątem ilości informacji diagnostycznej, jaką zawiera poszczególny estymator.

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych dla silników spalinowych należało zredukować ilość generowanych estymatorów do liczby pozwalającej uzyskać szczegółowy obraz stanu technicznego silnika w oparciu o sygnały drganiowe pod kątem ich wrażliwości na zmianę stanu oraz ilości informacji diagnostycznej. Do redukcji estymatorów posłużono się metodą „SVD – Singular Value Decomposition”, która stanowiła dodatkowy odrębny moduł aplikacji inżynierskiej. W metodzie „SVD” dokonując analizy danych jako wynik uzyskano uszeregowanie symptomów wraz z procentowym opisem udziału poszczególnego symptomu w opisie stanu danego obiektu, co pozwala na precyzyjną analizę stanu badanego obiektu. Zestawienie wybranych estymatorów i ich opis matematyczny przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wykaz estymatorów i ich opis matematyczny, generowanych za pomocą aplikacji „Symptomy”



## Logistyka - nauka

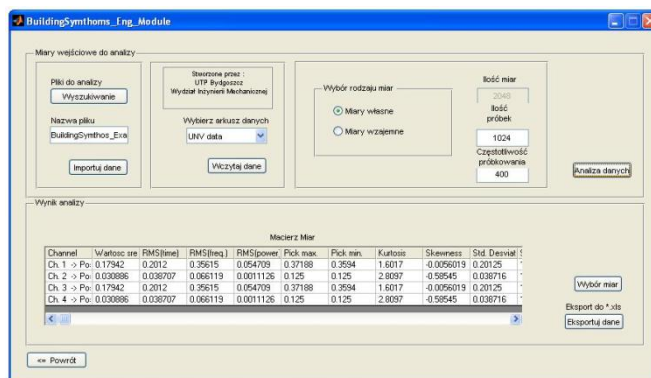
Estymator	Wzór	Interpretacja
Wartość średnia	$x_{ave} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	Estymacja wartości średniej sygnału - wskazuje wartość centrowania informacji. Duże wahania wartości nominalnej wskazują, że system znajduje się w stanie anormalnym. Z uwagi na jej podstawowe znaczenia w późniejszych definicjach innych charakterystyk warto ją wyznaczyć.
Wartość skuteczna R.M.S.	$x_{RMS} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$	Interpretacja sygnału deterministycznego jako sygnału ciągłego.
Wartość szczytowa sygnału	$x_{max} = \max \{x(t)\}$	Wartość maksymalna serii danych.
Kurtoza danych	$\beta_{kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^4}{x_{RMS}^4}$	Kurtoza jest miarą gdzie występuje koncentracja danych rozkładu z odniesieniem do rozkładu normalnego.
Odchylenie standardowe	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{x=1}^N (x - x_{ave})^2}$	Pierwsza miara dyspersji informacji wokół wartości średniej. Im mniejsza wartość odchylenia tym obserwacje są bardziej skupione wokół średniej.
Współczynnik kształtu	$s_f = \frac{x_{rms}}{x_{ave}}$	Wyraża dyspersję sygnałów. W obecności wielokrotnych komponentów harmonicznych danej częstotliwości generuje się duże odchylenie od wartości średniej, co zmienia współczynnik kształtu.
Współczynnik szczytu	$c_f = \frac{x_{max}}{x_{rms}}$	Obrazuje związek między wartością szczytową a poziomem globalnym całego pomiaru. Wzrasta, kiedy jest pulsacja od bicia komponentów obrotowych.
Współczynnik impulsowości	$i = \frac{x_{max}}{x_{ave}}$	Ustala związek między wartością średnią i wartością szczytową sygnału.
Częstotliwość Rice'a	$F_u = \frac{\tilde{y}(t)^{(1)}}{2\pi \tilde{y}(t)} ; \tilde{y}(t) - \text{wypadkowe funkcje.}$	Podaje wartość częstotliwość, która jest najbardziej reprezentatywna w widmie.
Współczynnik wygładzenia	$h_f = \frac{x_{max}}{x_p} ; x_p = \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{x_i}}{N} \right)^2$	Wzrastanie wykazuje akumulacje energii lub występuje, kiedy zmienia się z dyspersją danych.
Korelacja wzajemna	$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt$	To miara wyznaczająca podobieństwa procesów drganiowych dwóch sygnałów w dwóch różnych punktach pomiarowych.
Koherencja	$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{ G_{xy}(f) ^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}$	Funkcja, która spośród dwóch punktów wyznacza ten, który dostarcza większą ilość informacji o stanie technicznym obiektu.

Źródło: [1,4,7]

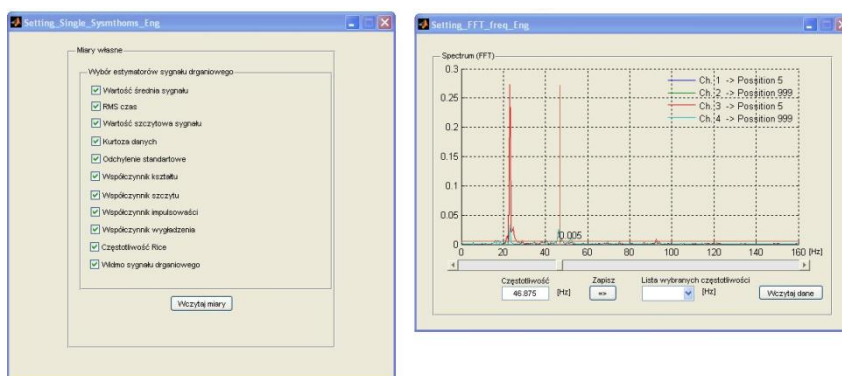
Na rysunku 3 przedstawiono okno dialogowe programu „Symptomy”. W przypadku wyboru do dalszej analizy miar własnych sygnału otwiera się okno dialogowe z wybranymi estymatorami sygnału drganiowego, na podstawie których generowana zostanie macierz



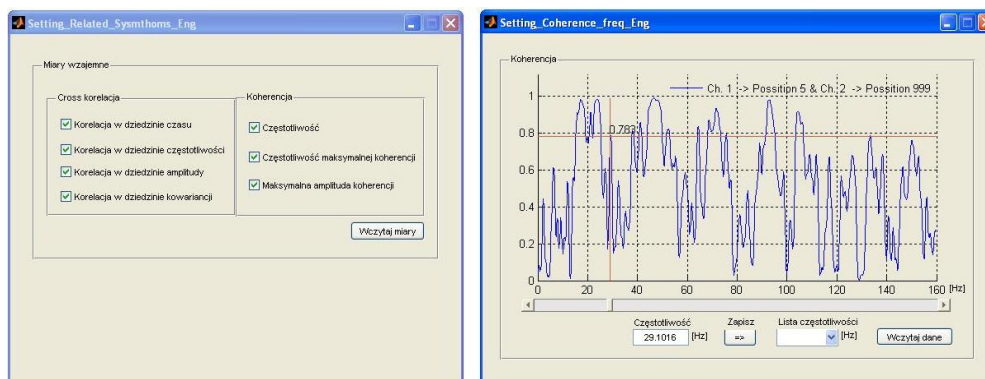
obserwacji dla miar własnych sygnału drganiowego oraz okno analizy widma wybranego sygnału, które przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Okno dialogowe aplikacji inżynierskiej „Symptomy”



Rys 4. Okno wyboru rodzaju miar sygnału po redukcji oraz okno widma sygnału drganiowego generowane dla wybranych sygnałów



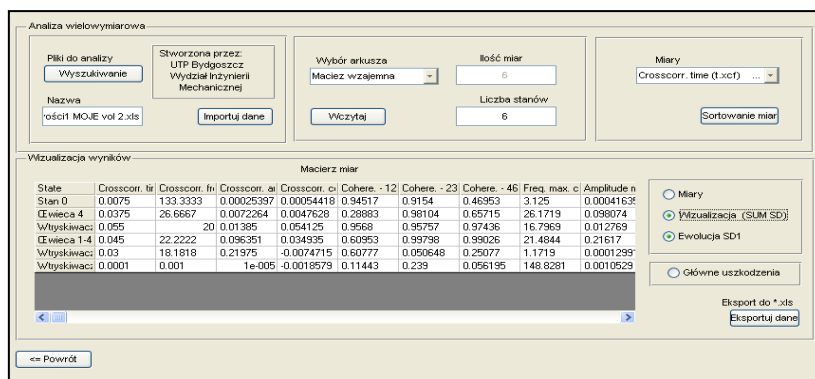
Rys 5. Okno wyboru miar wzajemnych sygnału drganiowego wraz z graficzną interpretacją funkcji koherencji dla zakresu danych

W przypadku, kiedy analizie poddajemy kilka sygnałów i interesują nas miary wzajemne pomiędzy sygnałami, wybieramy w oknie dialogowym opcję dotyczącą uzyskania estymatorów wzajemnych sygnału. Okno wyboru estymatorów przedstawiono na rysunku 5. Jako wynik estymacji uzyskujemy ponownie macierz obserwacji dla miar wzajemnych sygnału drganiowego. Tak uzyskane wyniki w postaci macierzy obserwacji możemy eksportować do arkusza kalkulacyjnego w celu archiwizacji danych pomiarowych. W celu

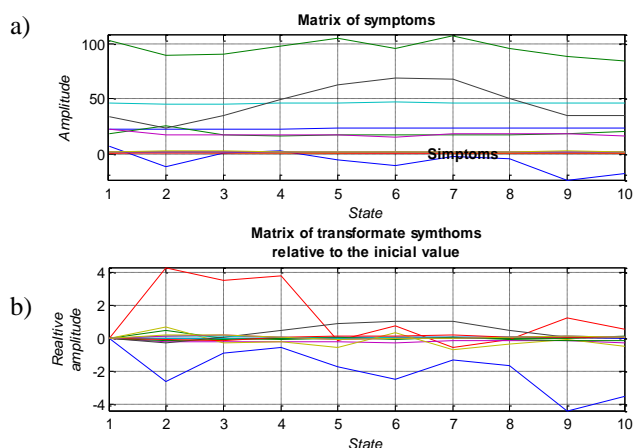


## Logistyka - nauka

uszeregowania estymatorów i wybraniu tych, które najlepiej obrazują zmiany stanu technicznego wraz z procentowym opisem ich udziału w opisie stanu należy zastosować metodę „SVD”, której okno dialogowe aplikacji przedstawiono na rysunku 6. W wyniku zastosowania tej metody uzyskano macierz rozkładu symptomów (rys. 7) oraz udział poszczególnych symptomów w opisie badanego stanu (rys. 8). [2,3,5]



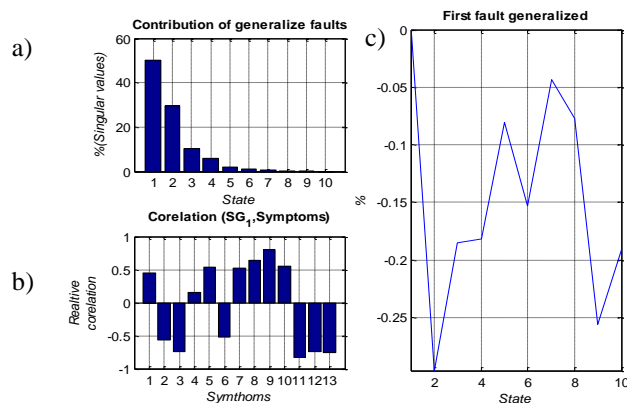
Rys. 6. Okno dialogowe modułu „SVD”



Rys. 7. Macierz symptomów w metodzie SVD. Rysunek 7a przedstawia graficzną interpretację macierzy wartości symptomów, rysunek 7b przedstawia macierz wartości symptomów po normalizacji i centrowaniu [2,5]

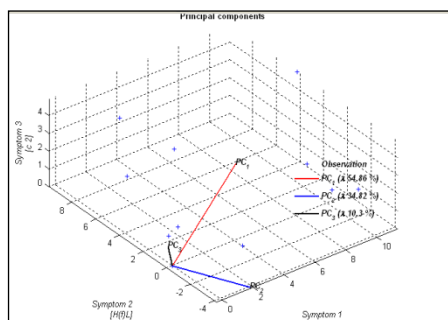
Na rysunku 7a przedstawiono graficzną interpretację macierzy wartości symptomów. Poszczególne wartości symptomów nie są ze sobą skorelowane ze względu na wartości i miana danych symptomów, co utrudnia dalszą ich interpretację. Na rysunku 7b przedstawiono macierz wartości symptomów po normalizacji i centrowaniu. Po dokonaniu tych przekształceń uzyskano uszeregowanie poszczególnych symptomów względem wartości początkowej, co pozwala na analizę korelacji sygnałów bez względu na miano danego symptomu.





Rys. 8. Udział poszczególnych symptomów w opisie stanu obiektu [2,5]

Na rysunku 8a przedstawiono graficzną interpretację procentowego udziału symptomów w tworzeniu symptomów uszkodzenia SD1. Dzięki metodzie SVD na kolejnym rysunku 8b uzyskano analizę korelacji poszczególnych symptomów względem uszkodzenia głównego a nadzorowanie zmiany stanu wyznaczone z SD1 i udział poszczególnych symptomów w uszkodzeniu głównym przedstawia rysunek 8c. Istnieje również możliwość wizualizacji trójwymiarowej trzech najistotniejszych estymatorów i ich udziału procentowego w opisie stanu technicznego danego obiektu, co przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wizualizacja trójwymiarowa wyników modułu „SVD” [5]

Na uwagę zasługuje fakt, iż wszystkie przedstawione aplikacje zostały połączone w jedną całość i stanowią kompleksowy zestaw narzędzi analizy danych, co znacznie wpływa na szybkość i trafność otrzymanych wyników.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia związane z zastosowaniem metod wibroakustyki w diagnozowaniu stanu silników spalinowych. Dzięki pomiarom sygnału drganiowego uzyskujemy szereg estymatorów, które następnie mogą być wykorzystywane w procesie diagnozowania. Zastosowanie dodatkowych narzędzi jak metoda „SVD” umożliwi ocenę udziału jakościowego i ilościowego każdej miary diagnostycznej w zmianie stanu silnika spalinowego. Nowoczesne oprogramowanie inżynierskie pozwala w pełni



wykorzystać zalety wykonania pomiarów w warunkach normalnej eksploatacji maszyn – szybkość obliczeń oraz zastosowanie metody SVD stanowi efektywne narzędzie diagnostyki eksploatacyjnej w oparciu o estymatory sygnału drganiowego, uwzględniające warunki pracy silnika. Artykuł powstał w ramach projektu badawczego **WND-POIG.01.03.01-00-212/09**.

### **Streszczenie**

Drgania zachodzą w każdym obiekcie mechanicznym, zwłaszcza wypełniającym swą funkcję celu w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu (bądź obciążeniu – jak w przypadku silników spalinowych). Drgania te jednak zaczynają być istotne dopiero po przekroczeniu pewnego progu wyznaczanego przez amplitudę i częstotliwość zjawiska. Po przekroczeniu tego progu drgania mogą być szkodliwe dla obiektu, bądź dla jego otoczenia (np.: następuje zmniejszenie trwałości materiału). W praktyce badań diagnostycznych, wykorzystanie drgań umożliwia opis stanu dynamicznego maszyn za pomocą uszkodzeniowo zorientowanych różnych symptomów drganiowych. W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania aplikacji inżynierskich do uzyskania estymatorów sygnału drganiowego, dzięki którym możliwy stanie się opis stanu technicznego obiektów mechanicznych.

### **Estimators of vibration process in the appraisal of the combustion engines technical condition**

Vibrations occur in every mechanical object. Vibrations could be essential just after the crossing certain threshold marked by amplitude and the frequency of the phenomenon. They can be harmful for the object after exceeding this threshold of the vibration, or for his surroundings (e.g.: decrease of the durability of the material). The engineer application “Symptoms” allows to process the vibroacoustic signal from the vibration amplitude of time domain to the chosen estimators of the vibration process. The applicability possibilities of the application to the estimators obtainment of signal were introduced in this work.

### **Literatura**

1. Cempel C.: Fundamentals of vibroacoustic condition monitoring. Handbook of condition monitoring. Londres, Inlaterra: Chapman and Hall, 1998. ISBN: 0-412-61320-4.
2. Cempel C.: SVD Decomposition of Symptom Observation Matrix as the Help in a Quality Assessment of a Group of Applications, Diagnostyka’35, PTDT Warszawa 2005.
3. Łukasiewicz M.: Investigation of the operational modal analysis and SVD applicability in combustion engine diagnostics, Monografia „Elementy diagnostyki maszyn roboczych i pojazdów”, Radom – Bydgoszcz – Borówno 2009.



4. Łukasiewicz M.: Vibration measure as information on machine technical condition, Studies&Proceedings of Polish Association for Knowledge Management 35, ISSN 1732-324X, Bydgoszcz 2010.
5. Łukasiewicz M.: The multidimensional analysis of the combustion engine investigations results with SVD method, Journal of KONES Powertrain and Transport vol.17, no.2, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2010.
6. Żółtowski B.: „Elementy dynamiki maszyn” ATR Bydgoszcz 2002.
7. Żółtowski B., Cempel Cz.: Inżynieria diagnostyki maszyn, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.