

PRÓBA ODWZOROWANIA MODELU MODALNEGO STANU TECHNICZNEGO SILNIKA SPALINOWEGO W ZASTOSOWANIU DO BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

Marcin ŁUKASIEWICZ

Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów, Akademia Techniczno – Rolnicza w Bydgoszczy,
ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: kmrip@mail.atr.bydgoszcz.pl

W pracy przedstawiono metodę identyfikacji stanu silnika spalinowego metodą eksploatacyjnej analizy modalnej. W wyniku analizy modalnej otrzymuje się model modalny w postaci zbioru częstości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia. Dzięki modelowemu podejściu do obiektu mechanicznego, możliwe staje się śledzenie zmian parametrów modeli wraz ze zmianami stanu badanego obiektu, a tym samym wcześniejsze im przeciwdziałanie, w istotny sposób poprawiając bezpieczeństwo pracy i niezawodność.

Słowa kluczowe: identyfikacja stanów silnika spalinowego, wnioskowanie diagnostyczne, eksploatacyjna analiza modalna

REPRESENTATION OF COMBUSTION ENGINE TECHNICAL STATE MODAL MODEL IN USE TO DIAGNOSTIC INVESTIGATIONS

The paper contains application of operational modal analysis in use of combustion engine technical state identification. As a result of modal analysis we got the modal model understood as comprises the set of free vibration frequencies, damping coefficients and free vibration forms. Thanks to the model approach to the mechanical object, we are allowed to tracking the model modification connected with technical object possible damages, and so-earlier precautions can be taken to improving the safety of work and its reliability.

Keywords: combustion engine technical states identification, diagnostic inference, operational modal analysis

1. WSTĘP

Każde urządzenie techniczne w danej chwili znajduje się w pewnym określonym stanie. Najogólniej stan maszyny, pojazdu można przedstawić jako zbiór wartości wszystkich parametrów określających dany obiekt w danej chwili czasowej t . Sekwencje czasową takich stanów można rozpatrywać jako czas istnienia urządzenia. Destrukcyjne oddziaływania wymuszających czynników zewnętrznych i wewnętrznych prowadzi nieuchronnie do zmiany stanu maszyny. Zastosowanie metod i środków diagnostyki technicznej a w szczególności diagnostyki wibroakustycznej umożliwia określenie stanu badanego obiektu- pojazdu lub maszyny w celu podjęcia decyzji dotyczących dalszego postępowania z maszyną.

Prace badawcze dotyczące diagnostyki pojazdów a w szczególności tłokowych silników spalinowych za pomocą sygnału wibroakustycznego koncentrują się wokół następujących problemów badawczych:

- kontrola procesu spalania w silniku;
- kontrola stanu elementów mechanicznych silnika;

- badania wpływu zmiennych czynników na wartość parametrów diagnostycznych sygnału wibroakustycznego [6].

Dotychczasowe badania przeprowadzone dla poszczególnych egzemplarzy silników tego samego typu, będących po jednakowym przebiegu wykazały, iż zachodzą znaczne różnice w stanach technicznych silników, wywołane głównie losową realizacją procesu starzenia. Zmusza to osoby prowadzące badania do każdorazowego wiązania symptomów wibroakustycznych z cechami stanu technicznego. Z dostępnych wyników badań eksperymentalnych silników spalinowych wynika, iż badając zjawiska wibroakustyczne zachodzące w silniku można na ich podstawie w dużym stopniu prawdopodobieństwa określić stan eksploatacyjny silnika i aktualną jakość regulacji poszczególnych układów.

Nowym podejściem do badania stanu technicznego silnika spalinowego jest zastosowanie eksploatacyjnej analizy modalnej jako jednego z narzędzi diagnostyki wibroakustycznej.

Eksploatacyjna analiza modalna stosowana w diagnozowaniu stanu konstrukcji umożliwia estymację modeli dynamicznych oraz ich analizę w oparciu o dane pomiarowe umożliwiające

estymację parametrów modelu modalnego, oraz syntezę odpowiedzi obiektu na zadane wymuszenie. Realizuje się ją w rzeczywistych warunkach pracy obiektu (przy wymuszeniach eksploatacyjnych). Stosuje się ją w przypadkach, gdy nie ma możliwości zastosowania zewnętrznego sterowanego wymuszenia oraz gdy nie można wyłączyć konstrukcji z normalnej eksploatacji. [1,3].

Ideą eksploatacyjnej analizy modalnej jest śledzenie zmian parametrów modelu modalnego, powstających na skutek rozregulowań, zużycia, uszkodzeń lub awarii, na podstawie bieżących obserwacji obiektu. W metodzie tej tworzy się model modalny w postaci zbioru częstotliwości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia, dla obiektu bez uszkodzeń, jako wzorzec. Następnie w czasie eksploatacji identyfikuje się model modalny i bada jego korelację z modelem dla obiektu nieuszkodzonego. W przypadku, gdy korelacja taka występuje można stwierdzić, że obiekt jest w stanie zdatności. W przypadku braku korelacji obiekt jest w stanie niezdatności spowodowanym np.: uszkodzeniem.

2. TESTOWANIE MODALNE SILNIKA SPALINOWEGO

Do podstawowych zadań diagnostyki technicznej obiektów technicznych (pojazdu, silnika) należy ocena stanu technicznego obiektu. Konieczność oceny stanu technicznego jest uwarunkowana potrzebą podejmowania decyzji związanych z eksploatacją danego obiektu oraz sposobem dalszego postępowania z obiektem.

Ocena stanu realizowana jest na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych, polegających na dokonaniu pomiarów i przeprowadzeniu analizy otrzymanych wyników. W celu przeprowadzenia badań diagnostycznych przyjmuje się modele obiektów diagnostyki, na podstawie, których generuje się algorytmy diagnostyczne.

Ogólny model obiektu dla oceny stanu w ujęciu symptomowym przedstawiony jest na rys. 1. Stan techniczny obiektu możemy tutaj określić dokonując obserwacji jego funkcjonowania, tj. jego wyjście główne przekształconej energii (lub produktu) oraz wyjście dysypacyjne, gdzie obserwujemy różne typy procesów resztkowych.

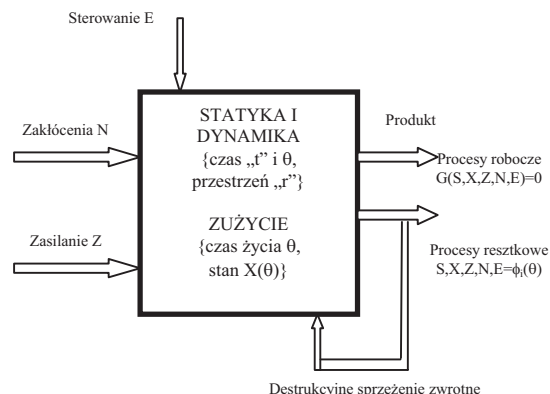
Przedstawiony model obiektu dla potrzeb diagnostyki w ujęciu mechanicznym opisuje równanie wektorowe:

$$G(X,S,E,Z,N) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

G – operator funkcjonowania obiektu, X – wektor zmiennych cech stanu opisujący strukturę obiektu, S – wektor zmiennych wyjściowych (odpowiedź obiektu), przedstawiający zbiór zawierający przekształconą energię Z , może to być proces roboczy, względnie jakość produktu lub procesy resztkowe, E – wektor zmiennych

wejściowych (wymuszenia), określa sposób sterowania obiektem oraz oddziaływania urządzeń diagnostycznych i warunki pracy, N – wektor zmiennych zakłóceń.



Rys. 1. Model obiektu diagnostyki [4]

Wektor stanu obiektu dla danego czasu eksploatacji θ określa się zależnością:

$$X = g(S,E,Z,N) \quad (2)$$

gdzie:

g – operator wielkości składowych modelu.

Stosując uproszczenie dla potrzeb eksperymentu, zakłada się stałość w sensie wartości średnich wektorów $E, Z = 0$, w wyniku, czego uzyskujemy uproszczony wzór stanu obiektu:

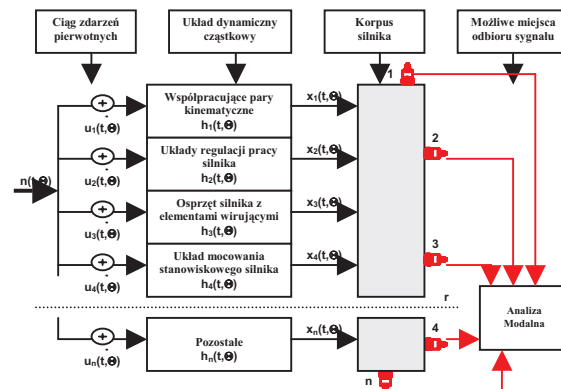
$$X = F(S)_{(E,Z = \text{const})} + N \quad (3)$$

Uwzględniając dziedziny poszczególnych wektorów tej relacji otrzymujemy podstawowe równanie stanu w następującej formule:

$$X(t,\theta,r) = A(r) S(\theta,r) + N(\theta,r) \quad (4)$$

Wektorowy opis struktury obiektu, jego wejść: zasilania, sterowania i zakłóceń oraz wyjść energetycznych (użytecznych i resztkowych) prowadzi do opisu możliwych relacji diagnostycznych.[4]

Podczas projektowania eksperymentu zaproponowano model generacji sygnału diagnostycznego silnika spalinowego, który przedstawiony został na rys. 2.



Rys. 2. Model generacji sygnału diagnostycznego zaproponowany dla silnika spalinowego [7]

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 umieszczono przetworniki drgań tak, by można było w wyniku przeprowadzonych pomiarów sygnałów wyjściowych i zastosowaniu eksploatacyjnej analizy modalnej wyznaczyć model modalny badanego silnika. Przez $n(t, \theta)$, oznaczono tutaj przypadkowe oddziaływanie występujące z tytułu obecności mikrozjawisk dynamicznych takich jak tarcie itp.[5].

Ze względu na złożoność procesów zachodzących w silniku mamy dużą ilość ciągów zdarzeń elementarnych, które mają wpływ na wyniki prowadzonych badań.

Ocenę wpływu rozwijającego się uszkodzenia na parametry modelu modalnego można oszacować stosując teorię wrażliwości do modelu strukturalnego w postaci:

$$M\ddot{\chi} + C\dot{\chi} + K\chi = x(t) \quad (5)$$

gdzie: M, C, K – macierze mas, tłumienia i sztywności, $\ddot{\chi}, \dot{\chi}, \chi$ – wektory przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń, $x(t)$ – wektor sił wymuszających [2,3].

Równanie można przekształcić do współrzędnych głównych, stosując transformację daną wzorem:

$$x(t) = \Psi q(t) = \sum_{r=1}^n \Psi_r q_r(t) \quad (6)$$

gdzie: Ψ jest macierzą modalną, której kolumny są postaciami drgań własnych odpowiadających danej częstości własnej, $q(t)$ jest współrzędną główną (modalną), [2,3]. W celu wyznaczenia parametrów modelu modalnego należy rozwiązać zagadnienie własne w postaci:

$$K\{\Psi_i\} - \Lambda_i M\{\Psi_i\} = \{0\} \quad (7)$$

gdzie: Λ_i – wartości własne, $\{\Psi_i\}$ – wektory własne.

Po serii przekształceń uzyskano w efekcie zależność:

$$\frac{\partial f_i}{\partial p} = \frac{1}{8\Gamma^2 f_i} \{\Psi_i\}^T \frac{\partial K}{\partial p} \{\Psi_i\} - \frac{f_i}{2} \Psi_i^T \frac{\partial M}{\partial p} \Psi_i \quad (8)$$

Obiektem badań empirycznych był silnik spalinowy nr 138 C.2.048 o pojemności skokowej 1,4l, mocy 55 kW /75 KM powszechnie stosowany w modelu Fiat Uno 75i.e. Silnik wyposażony we wtrysk paliwa firmy Bosch typu L-Jetronic znajduje się na stanowisku badawczym laboratorium silników spalinowych i umożliwia prezentację

generowanych sygnałów drganiowych oraz badanie wpływu jego rozregulowań na zmianę sygnałów wibroakustycznych.

W przeprowadzonych badaniach empirycznych, wykorzystano metodę LSCE, za pomocą, której aproksymuje się przebieg funkcji korelacji sumą zanikających wykładniczo funkcji harmonicznnych.

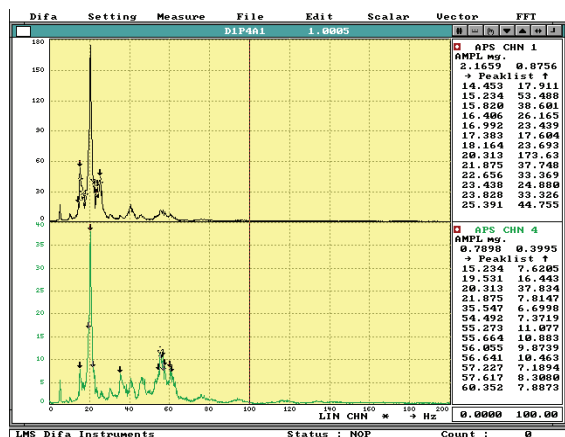
Metoda LSCE identyfikacji parametrów modelu modalnego jest realizowana w dziedzinie czasu, stosowana do odpowiedzi impulsowej układu jest dobrze znaną techniką w klasycznej eksploatacyjnej analizie modalnej dającą estymatory globalne biegunów układu w postaci częstości własnych i modalnych współczynników tłumienia [2,3,4,5].

Przeprowadzone badania polegały na wyznaczeniu miar drganiowych dla sprawnego silnika i porównaniu ich z miarami wyznaczonymi dla układu uszkodzonego (uszkodzona świeca zapłonowa, niesprawny wtryskiwacz) oraz dokonaniu oceny otrzymanych wyników metodami analizy modalnej.

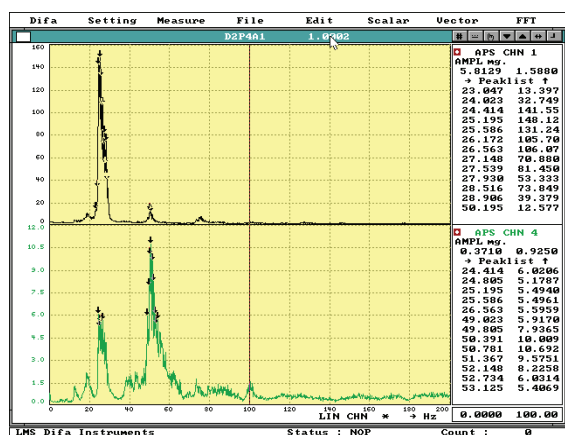
Dla potrzeb przeprowadzenia eksperymentu zasymulowano następujące modele stanu silnika:

- *Stan pierwszy (A)* - odpowiadał stanowi zdatności silnika;
- *Stan drugi (B)* - odpowiadał stanowi silnika, w którym założono, że w trakcie pracy silnika na jednym z cylindrów jest uszkodzona świeca zapłonowa;
- *Stan trzeci (C)* - odpowiadał stanowi silnika, w którym założono, że w trakcie pracy silnika na jednym z cylindrów jest uszkodzony wtryskiwacz.

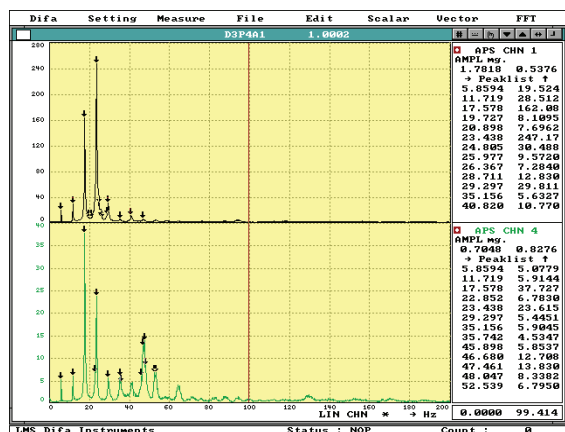
Przeprowadzono pomiary silnika dla prędkości obrotowej 900 obr/min – prędkość obrotowa biegu jałowego, w wybranych punktach na wymuszenia eksploatacyjne. Analizę dokonano dla zakresu częstości szerokości pasma od 0 – 200 Hz i liczbie próbkowania 2048. Dla tak założonych stanów silnika dokonano analizy charakterystyk amplitudowych, w celu stwierdzenia poprawności przyjętych założeń badawczych, które przedstawiono na rysunkach 3,4 oraz 5.



Rys.3. Charakterystyka amplitudowa sygnału dla stanu A silnika



Rys.4. Charakterystyka amplitudowa sygnału dla stanu B silnika



Rys.5. Charakterystyka amplitudowa sygnału dla stanu C silnika

Na przedstawionych powyżej rysunkach uwzględniono charakterystyki amplitudowe 2 sygnałów – górny przebieg odpowiadał charakterystyce sygnału otrzymanego z punktu odbioru sygnału w pobliżu świecy zapłonowej, dolny z punktu odbioru sygnału w osi wałka rozrządu badanego silnika.

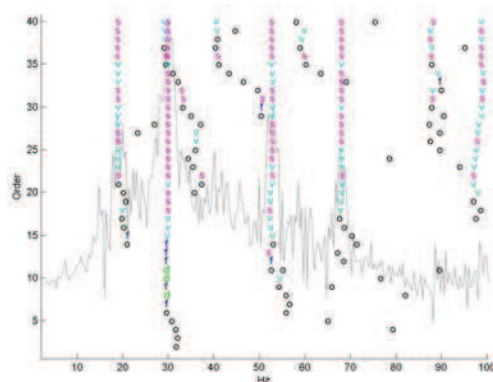
Zarejestrowane dane pomiarowe przetworzono za pomocą pakietu oprogramowania do analizy modalnej „Vioma”. Do estymacji parametrów

modelu modalnego wykorzystano metodę LSCE. Algorytm LSCE składa się z dwóch kroków: w pierwszym zidentyfikowane zostają bieguny układu, w drugim na ich podstawie estymowane są postacie drgań własnych układu.

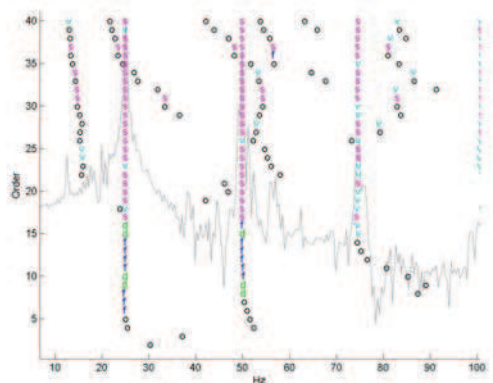
Badany obiekt został zamodelowany wielomianami o określonych rzędach: minimalnym 1 i maksymalnym 40 oraz krokiem estymacji 1. Zastosowanie tak wysokiego rzędu wielomianu pozwala na uzyskanie wyników zbliżonych do rzeczywistych, jednak ujemnym skutkiem tego jest uwzględnienie w modelu tzw.: obliczeniowych drgań własnych, które w obiekcie rzeczywistym nie występują i są skutkiem występowania błędów w danych eksperymentalnych.

Po estymacji uruchamiane jest narzędzie „Stabilisation Diagram”, wyświetlające diagram stabilizacyjny i umożliwiający wybór biegunów badanego układu [3]. W wyniku przeprowadzonych pomiarów w eksperymencie uzyskano następujące diagramy stabilizacyjne dla założonych stanów silnika, przedstawione na rysunkach 6,7 oraz 8.

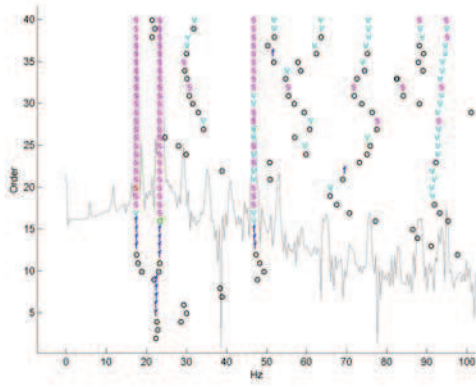
Na wykresach przyjęto następujące oznaczenia: o – bieguny niestabilne; f – biegun ma stałą częstość; v – biegun ma stałą częstość i wektor modalny; d – biegun ma stabilną częstość wibracji oraz tłumienie, s – biegun stabilny.[3]



Rys. 6. Diagram stabilizacyjny dla stanu A



Rys. 7. Diagram stabilizacyjny dla stanu B



Rys. 8. Diagram stabilizacyjny dla stanu C

Na podstawie tak przetworzonych informacji tworzymy model modalny układu dla założonych stanów silnika.

3. ANALIZA OTRZYMANÝCH WYNIKÓW

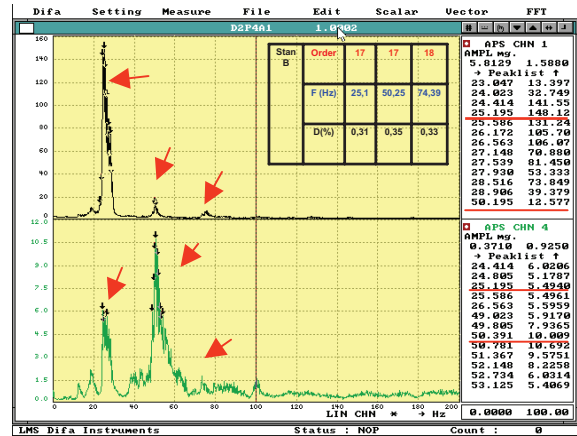
Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych stworzono model modalny silnika spalinowego dla założonych stanów dynamicznych. W modelu podano wielkości rzędu modalnego, częstości drgań własnych oraz współczynników tłumienia. Model modalny dla silnika otrzymany na podstawie diagramów stabilizacyjnych został przedstawiony w tablicy 1.

Tablica 1. Model modalny badanego silnika.
 Order – rząd modelu modalnego, F – wartość częstości własnych, D – współczynnik tłumienia

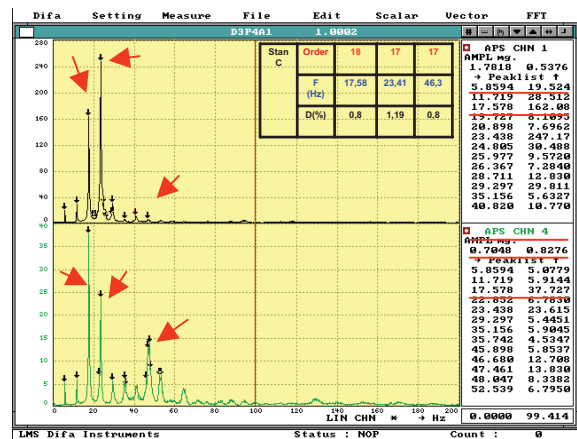
Stan A	Order	24	18	14	21	
	F (Hz)	19,40	29,85	54,06	68,26	
	D (%)	4,87	0,4	3,8	2,15	
Stan B	Order		17	17		18
	F (Hz)		25,1	50,25		74,39
	D (%)		0,31	0,35		0,33
Stan C	Order	18	17	17		
	F (Hz)	17,58	23,41	46,3		
	D (%)	0,8	1,19	0,8		

Tak utworzony model modalny zestawiono z charakterystykami amplitudowymi badanego sygnału, dzięki czemu zostały zidentyfikowane częstości charakterystyczne dla przyjętego stanu.

Przykładowe porównanie modelu modalnego z charakterystyką amplitudową przedstawiono na rysunkach 9 i 10 - w których przedstawiono zestawienie stanu B, w którym założono, że w trakcie pracy silnika na jednym z cylindrów jest uszkodzona świeca zapłonowa oraz stanu C, w którym założono, że w trakcie pracy silnika na jednym z cylindrów jest uszkodzony wtryskiwacz.



Rys. 9. Porównanie modelu modalnego z charakterystykami amplitudowymi – stan B silnika



Rys. 10. Porównanie modelu modalnego z charakterystykami amplitudowymi – stan C silnika

4. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych, przedstawionych w tabelach, stwierdzamy, iż możliwym jest do wyznaczenia model modalny stanu technicznego badanego silnika a następnie na jego podstawie jesteśmy w stanie zidentyfikować aktualny stan techniczny badanego obiektu.

Otrzymane w eksperymencie parametry modalne oraz estymaty liczbowe wielkości sygnału drganiowego wskazują jednoznacznie, że założone w eksperymencie wybrane stany zdadności silnika spalinowego dały się odwzorować w parametrach modalnych oraz innych wielkościach charakteryzujących drgania i są możliwe do identyfikacji.

Obecne prace badawcze dla przedstawionej metody identyfikacji stanu technicznego silnika spalinowego przy zastosowaniu metod eksploatacyjnej analizy modalnej są w fazie badań wstępnych i dlatego założone stany są stanami,

które w gwałtowny sposób ingerują w poprawne funkcjonowanie silnika i co się z tym wiąże są dobrze odwzorowane w sygnale wibroakustycznym.

W zależności od tego jak dokładną informację o aktualnym stanie badanego obiektu chcemy otrzymać, musimy zbudować bardziej lub mniej skomplikowany model układu, wyznaczając do tego celu większą ilość punktów pomiarowych. Jak możemy zauważyć w tabeli, model modalny układu dla założonych stanów dynamicznych silnika po zestawieniu wyników różni się między sobą wartościami poszczególnych parametrów modalnych: częstości własnej, rzędu modelu modalnego i współczynników tłumienia, dzięki czemu jesteśmy w stanie określić aktualny stan techniczny obiektu w dowolnym punkcie pomiarowym.

Analiza rozmieszczenia punktów pomiarowych wykazuje, że w celu sporządzenia bardziej precyzyjnego opisu stanu badanego silnika koniecznym jest zwiększenie ilości punktów pomiarowych i referencyjnych, co w lepszym stopniu odwzorowałoby aktualny stan silnika.

Bazując na otrzymanych wynikach z silnika, dokonując pomiarów na innym obiekcie tego typu jesteśmy w stanie określić aktualny stan techniczny badanego obiektu, poprzez porównanie otrzymanych wyników z wynikami wzorcowymi i przypisaniu ich do konkretnego stanu wzorcowego, który odpowiada konkretnemu uszkodzeniu obiektu lub jego braku.

Przeprowadzone badania wskazują, iż nowoczesne oprogramowanie inżynierskie zapewnia wykorzystanie w pełni zalet wykonania pomiarów w warunkach normalnej eksploatacji maszyn, skraca czas zarówno pomiarów i analizy wyników oraz przyczynia się do precyzyjnego opisu aktualnego stanu dynamicznego badanego obiektu technicznego, a zastosowanie eksploatacyjnej analizy modalnej pozwala na zastosowanie tej nowoczesnej metody do analizy i opisu aktualnego stanu dynamicznego badanego silnika.

LITERATURA

- [1] Łukasiewicz M.: „Zastosowanie analizy modalnej w badaniu stanu przekładni zębatych”, *Mechanika 53 ATR Bydgoszcz 2002.*
- [2] Uhl T.: „Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych” WNT Warszawa 1997.
- [3] Uhl T., Kurowski P.: „VIOMA – instrukcja użytkownika” AGH Kraków 2002.
- [4] Żółtowski B.: „Elementy dynamiki maszyn”, ATR Bydgoszcz 2002.
- [5] Żółtowski B.: „Badania dynamiki maszyn”, ATR Bydgoszcz 2002.
- [6] Żółtowski B.: „Badania wibroakustyczne w pojazdach mechanicznych”, *Mechanika 33 ATR Bydgoszcz.*

- [7] Żółtowski B., Łukasiewicz M., Bas W.: „Próba odwzorowania modelu modalnego w miarach procesu drganiowego w zastosowaniu do badań diagnostycznych” *Materiały konferencyjne XXXII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Góra 2005.*



Mgr inż. Marcin Łukasiewicz jest asystentem w Katedrze Maszyn Roboczych i Pojazdów Wydziału Mechanicznego ATR, członkiem SIMP. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami wibroakustyki, analizy modalnej oraz zagadnieniami rozpoznawania i klasyfikacji stanów, aparaturą diagnostyczną. Autor kilkudziesięciu publikacji z zakresu wibroakustyki oraz analizy modalnej.