

ZASTOSOWANIE SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH W DIAGNOZOWANIU MASZYN

Marcin JASIŃSKI, Stanisław RADKOWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, jachuu@simr.pw.edu.pl, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

Jedną z metod diagnozowania i prognozowania wczesnych faz rozwoju uszkodzeń, jest korelacja obiektywnego stanu technicznego z diagnostycznym parametrem uzyskanym z sygnału wibroakustycznego. Korzystając z metody składowych głównych (PCA) mamy możliwość uzyskania liniowego przekształcenia zmiennych, w związku z czym redundantna informacja jest redukowana, co pozwala uzyskać bardziej wiarygodny model diagnostyczny. Obiektem wybranym do badań, prezentowanym w naszym referacie, jest przekładnia zębata. Konkludując, metoda przedstawiona w tym referacie unika potrzeby wykonywania czasochłonnych i kosztownych modeli analitycznych. Możliwe jest oszacowanie typu i stopnia uszkodzenia przekładni zębatej na podstawie odpowiednio przygotowanego, wymiarowo zredukowanego sygnału wibroakustycznego, bez wykonywania modeli symulacyjnych.

Słowa kluczowe: Diagnostyka wibroakustyczna, analiza składowych głównych (PCA), rozkładu macierzy względem wartości własnych (SVD).

USE OF PRINCIPAL COMPONENTS IN MACHINERY DIAGNOSTICS.

One of method of defects evolution early stages diagnostic and prediction, is the correlation of the objective technical condition with the diagnostic parameter received from the vibroacoustic signal. Principal Components Analysis (PCA) offers an approach for linear transformation of the problem variables so that the redundant information is reduced and the diagnostic model is more easily extracted. The product chosen for the investigation presented in this paper is a gear. To conclude, the method presented here avoids the need for performing analytical model which are time consuming and costly. It is possible to estimate the type and stage of defect to any gear vibroacoustic signal from the objective parameters of the specially prepared signal without performing simulation models.

Keywords: Vibroacoustic diagnostic, Principal Components Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD)

1. WPROWADZENIE

Szczególne miejsce wśród metod diagnostyki wibroakustycznej zajmują problemy wczesnego wykrywania uszkodzeń. Zauważmy, że proces formowania się uszkodzeń może prowadzić zarówno do intensyfikacji zjawisk nieliniowych, jak i występowania efektów niestacjonarnych, nawet, jeśli we wczesnych fazach intensywność uszkodzeń jest niewielka a przyrost poziomu drgań i hałasu pomijalny, w odróżnieniu od stanów awaryjnych. Charakterystyki częstotliwościowe otrzymywane za pomocą transformaty Fouriera na podstawie próbki o określonych rozmiarach mogą być interpretowane jako uśredniona częstotliwościowa struktura tego sygnału dla całego przedziału analizy. Szerszy opis tego zagadnienia został zawarty w pracy [1]. W tym miejscu zauważmy jedynie, że powstaniu uszkodzenia i niskoenergetycznym fazom jego

rozwoju towarzyszy najczęściej lokalne zaburzenie przebiegu sygnału, które może wywołać mierzalne zmiany częstotliwościowej struktury sygnału, na dodatek zmienne w czasie. Ten stan rzeczy skłania do sformułowania diagnozy powstawania uszkodzenia na podstawie diagnostycznej informacji przenoszonej przez niestacjonarne zaburzenia i efekty nieliniowe.

Zauważmy, że analiza niskoenergetycznego impulsowego zaburzenia wywołującego szerokopasmową odpowiedź o niewielkiej amplitudzie wymaga uwzględnienia nie tylko informacji o zmianach mocy sygnału, ale również o jego fazie, co wskazuje na konieczność wyjścia poza informacje zawarte w procesie drugiego rzędu. Bowiem o ile dostateczną charakterystyką procesu gaussowskiego o wartości średniej równej zero jest jego funkcja korelacji, to w przypadku procesów o niegaussowskich rozkładach

prawdopodobieństwa odpowiednio funkcja korelacji lub widmo mocy dostarczają jedynie częściowej informacji o procesie.

Przy dużej liczbie danych wejściowych i skomplikowanej kinematyczno-dynamicznej strukturze przekładni zębatej oraz całego układu napędowego, pomocne okazuje się zbudowanie modelu empirycznego diagnozującego stan przekładni zębatej.

Stąd coraz częściej podejmowane są próby tworzenia zależności regresyjnych, na podstawie odpowiednio zaplanowanego eksperymentu diagnostycznego. Dodatkowe możliwości związane są z zastosowaniem metod statystyki wielowymiarowej, w szczególności badanie związków korelacyjnych za pomocą PCA (Principal Components Analysis) Metoda ta pozwala określić główne składowe, opisujące podstawowe cechy zbioru, tym samym umożliwia przeprowadzenie redukcji wymiaru zbioru danych. Tak przekształcony zbiór może w następnym etapie być wykorzystany do budowy empirycznego modelu diagnostycznego. Celem pracy jest szersze omówienie toku postępowania w przypadku diagnozowania rozwoju uszkodzenia w przekładni zębatej z wykorzystaniem PCA i analiza możliwości zbudowania odpowiedniego modelu empirycznego.

2. ZASTOSOWANIE PRZEKSZTAŁCENŃ PCA I SVD

Podstawową transformacją stosowaną w tym ujęciu jest Principal Components Analysis (PCA) - analiza głównych składowych. Jest to metoda statystyczna, której celem jest przekształcenie skorelowanych danych podstawowych w zbiór nieskorelowanych parametrów diagnostycznych przy użyciu macierzy kowariancji (lub macierzy korelacji). Jeżeli wektor obserwacji zapisany w postaci:

$$\mathbf{X} = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (1)$$

będzie opisywał zmienne, wtedy PCA zdekomponuje wektor obserwacji \mathbf{X} w następujący sposób:

$$\mathbf{X} = \mathbf{TP}^T = \mathbf{t}_1\mathbf{p}_1^T + \mathbf{t}_2\mathbf{p}_2^T + \dots + \mathbf{t}_m\mathbf{p}_m^T = \sum_{i=1}^m \mathbf{t}_i\mathbf{p}_i^T \quad (2)$$

gdzie:

\mathbf{p}_i – wektory własne kowariantnej macierzy z \mathbf{X} ,

\mathbf{P} – jest zdefiniowane jako macierz wejściowa składowych głównych,

\mathbf{T} – jest macierzą wynikową składowych głównych.

Macierz \mathbf{P} daje informację do której wartości przyporządkować największą zmianę indywidualnych składowych głównych (pc) np. są to współczynniki w modelu PC [2], które

wydobywają informację ze skupiska danych i identyfikują zależności pomiędzy innymi działającymi zależnościami które są otrzymane z wyniku. Konwencjonalna droga otrzymania składowych głównych wymaga zbudowania macierzy korelacji z wartości początkowych a następnie wyliczenia wartości własnych i wektorów własnych tej macierzy. Zbudowanie takiej macierzy korelacji i wyliczenie wartości oraz wektorów własnych zajmuje rachunkowo dużo czasu.

Z tego względu do zaimplementowania PCA w budowie modelu empirycznego będziemy używać Singular Value Decomposition (SVD) czyli rozkładu macierzy względem wartości własnych. W obróbce SVD macierz danych \mathbf{X} jest zdekomponowana za pomocą następującego równania:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\boldsymbol{\lambda}\mathbf{P}^T \quad (3)$$

gdzie:

\mathbf{U} – są to wektory własne,

$\boldsymbol{\lambda}$ – wartości własne,

\mathbf{P}^T – macierz wejściowa.

Podstawową zaletą SVD jest to, że wszystkie trzy macierze są uzyskane w jednej operacji bez konieczności wyliczenia macierzy kowariancji jak było opisane wcześniej. Implementacja PCA za pomocą Singular Value Decomposition pracuje w środowisku programu MATLAB [3].

3. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko do przyspieszonych badań wytrzymałości zmęczeniowej zęba wyposażono w układ telemetryczny firmy ESA Messtechnik GmbH, umożliwiający transmisję danych z wirujących elementów maszyn. Układ ten wykorzystano do pomiaru naprężeń u podstawy zęba koła zębatego w badaniach zmęczeniowej trwałości na stanowisku mocy krążącej znajdującym się w IPBM PW. Opis i działanie układu zaprezentowano w pracy [4]. Czynnym elementem pomiarowym były tensometry firmy MEASUREMENTS GROUP INC o oporności $350\Omega \pm 0.2\%$, stałej $2.06 \pm 1.0\%$ i powierzchni bazowej 0.79×0.81 mm, zakresie temperatur $-75 \div 175^\circ\text{C}$, naklejone u podstawy jednego z zębów. Umożliwia to śledzenie zmian naprężeń u podstawy zęba w trakcie zbliżania się do chwili wyłamania zęba. Pomiar naprężeń w kole zębatym odbywał się w czasie rzeczywistym podczas rzeczywistej pracy przekładni (w oleju i w temperaturach do 90°C , prędkość obrotowa wału zębnika ok. 1460 obr/min).

Podkreślić należy fakt, iż ząb który uległ wyłamaniu podczas eksperymentu nie był zębem na którym naklejono tensometry.

Ze względu na istotne techniczne trudności związane z wykonywaniem pomiarów naprężeń w stopie zęba koła zębatego postanowiono sprawdzić czy istnieje możliwość powiązania zmian struktury

naprężeń ze zmianami występującymi w sygnale wibroakustycznym emitowanym przez przekładnię zębatą, a mierzonym przed akcelerometr trójosiowy zamocowany na górze korpusu przekładni. Umożliwiłoby to śledzenie zmian naprężeń koła zębatego na podstawie analizy sygnału SWA przekładni.

4. ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI SVD - EKSPERYMENT LABORATORYJNY

W pracy [5] autorzy przedstawili przydatność transformacji PCA do badania modulacji sygnałów wibroakustycznych, teraz zajmiemy się wykorzystaniem własności transformacji SVD do budowy parametru (symptomu) diagnostycznego.

Wyniki eksperymentu laboratoryjnego poddano przekształceniom mającym na celu uzyskanie parametru diagnostycznego, który najwierniej oddaje rozwój pęknięcia zmęczeniowego w stopie zęba.

Analizowane były: trzy kanały drganiowe drgania góry obudowy reduktora w płaszczyznach X, Y i Z; kanał z telemetrycznym pomiarami naprężeń w stopie zęba oraz trigger na wale wejściowym.

W pierwszym kroku sygnał był synchronizowany, po czym do dalszej analizy przekazywano sygnał pochodzący z jednego obrotu wału (eliminacja częstości obrotowej wału i związanych z nią zaburzeń).

Następnie z każdego z kanałów obliczana była wariancja oraz momenty trzeciego i czwartego rzędu, tworząc kolumny w macierzy wejściowej (1), a wierszami były kolejne pomiary aż do wyłamania zęba.

Tak przygotowaną macierz wprowadzono do programu SVDSYMP0, napisanego w środowisku MATLAB przez prof. Cempela [6], a bazującego na transformacji SVD (3).

Parametrem diagnostycznym, który obserwowaliśmy, był „fault symptom” – SD1 utworzony w następujący sposób:

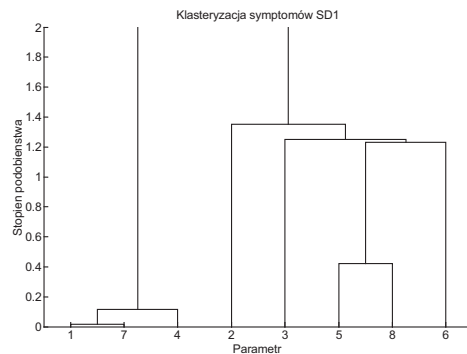
$$SD_i = \mathbf{u}_i \lambda_i \quad (4)$$

gdzie:

\mathbf{u}_i – wektory własne,

λ_i – wartości własne.

Powyższy parametr porównywaliśmy dla macierzy obserwacji utworzonej dla wszystkich kanałów i sposobów analizy statystycznej oraz dla macierzy obserwacji utworzonych odpowiednio dla poszczególnych kanałów, jak i też dla poszczególnych analiz (Rys. 1).



Rys. 1. Klasteryzacja symptomu SD1 dla wszystkich pomiarów

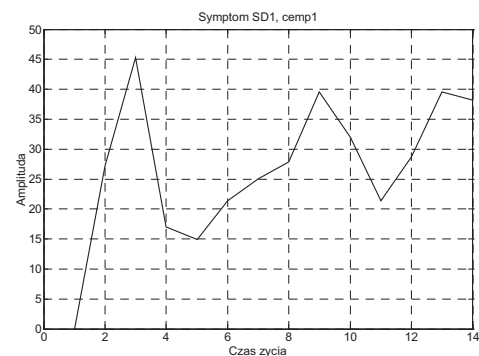
Na powyższym wykresie widzimy dwie grupy bardzo do siebie podobnych parametrów diagnostycznych utworzonych z pomiarów: 1, 7, 4 oraz 5, 8.

Do parametru utworzonego dla całej macierzy obserwacji (Rys. 2) bardzo podobne są parametry utworzone dla drgań oś X oraz momentu trzeciego rzędu. Niestety analizując powyższy parametr, nie możemy jednoznacznie stwierdzić, w którym momencie nastąpił rozwój uszkodzenia.

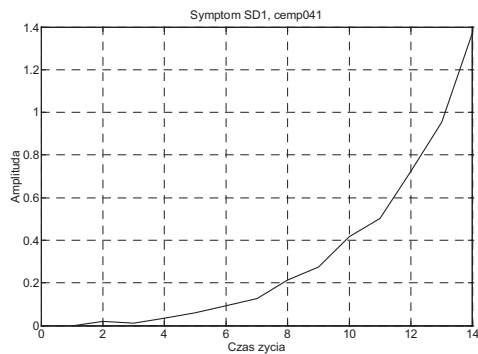
Analizując fizyczne własności naprężeń, chcieliśmy znaleźć pewien podobny przebieg określonych parametrów sygnału drganiowego. Wyzaczyliśmy parametr diagnostyczny z macierzy zbudowanej dla kanału 4 (telemetryczny pomiar naprężeń) przedstawiony na rysunku 3 oraz obliczyliśmy parametr zbudowanego z macierzy, w której zawarte były momenty czwartego rzędu obliczone dla wszystkich 4 kanałów (Rys. 4). Powyższe parametry są drugą co wartości miary podobieństwa grupą z rysunku 1 (parametr 5 i 8).

Różnorodność przebiegów symptomów wiąże się na pewno z dosyć dużym skomplikowaniem sygnału wibroakustycznego, mamy w nim dużo informacji niestacjonarnych zaburzających analizę statystyczną.

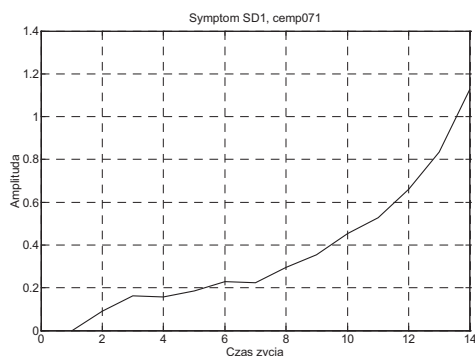
Najbardziej wiarygodną informację niesie zmiana naprężeń w kole zębatych oraz analiza statystyczna polegająca na obliczeniu momentu czwartego rzędu.



Rys. 2. Symptom SD1 z pełnej macierzy obserwacji



Rys. 3. Symptom SD1 z macierzy obserwacji dla kanału 4 (pomiar naprężeń)



Rys. 4. Symptom SD1 z macierzy obserwacji policzonej dla momentu 4-rzędu

5. WNIOSKI

Modele empiryczne mogą mieć zastosowanie w przypadkach, kiedy dysponujemy dużą liczbą zróżnicowanych danych diagnostycznych. Aby skompresować te dane i uzyskać z nich użyteczną informację diagnostyczną pomocne okazuje się zastosowanie przekształcenia SVD.

Z przedstawionych rezultatów badań wynika, że istotne znaczenie dla uzyskania fizykalnie dobrze zdefiniowanego modelu empirycznego ma właściwy dobór wejściowego wektora obserwacji.

Ważne jest aby poddać weryfikacji tak utworzoną macierz diagnostyczną aby w pełni wykorzystać możliwości wykrycia informacyjnego parametru diagnostycznego.

Istotną korzyścią takiego zastosowania metody było znalezienie związku pomiędzy opracowanym parametrem a stanem technicznym, w tym przypadku zależności pomiędzy wzrostem parametru opisującego naprężenia a rozwojem pęknięcia w stopie zęba koła zębatego.

Na uzyskanie zadowalających rezultatów znaczny wpływ miało:

- przeprowadzenie wstępnej, uszkodzeniowo-zorientowanej analizy,
- wybranie odpowiedniej, informacyjnie istotnej macierzy diagnostycznej zawierającej w pierwszym przypadku informację na temat zmiany naprężeń w

stopie zęba, a w drugim obliczony moment czwartego rzędu ze wszystkich kanałów.

LITERATURA

- [1].Cempel C.: (1989) Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, PWN, Warszawa.
- [2].Baydar N, Ball A.: (2001) Detection of Gear Failures Using Wavelet Transform and Improving its Capability by Principal Component Analysis. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Elsevier Science Ltd.
- [3].Wise M.B., Gallagher N.B.: (2000) PLS_Toolbox 2.1 for use with MATLAB. Users Manual.
- [4].Radkowski S., Zawisza M.: (2003) Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w badaniu powstawania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego u postawy stopy zęba w przekładni zębatej, XXX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, 61.
- [5].Jasiński M., Radkowski S.: (2003) Signal Preparation for the Method of Principal Components, Machine Dynamics Problems, Vol. 27, No 3, 79÷92.
- [6].Cempel C.: (2003) Multidimensional Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation, Mechanical Systems and Signal Processing 17(6), 1291÷1303.



Prof. Stanisław RADKOWSKI profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i analizą ryzyka technicznego



mgr inż. Marcin JASIŃSKI asystent w Pracowni Wibroakustyki Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i modelami empirycznymi.