

APPLICATION OF EVOLUTION OF SINGULAR VALUES IN MULTISYMPATOM DIAGNOSTICS OF MACHINES

Maciej TABASZEWSKI, Czesław CEMPEL

Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechniki Poznańskiej
Ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
fax. 61 665 2307, email Maciej.Tabaszewski@put.poznan.pl

Summary

The paper presents a possibility of observation of singular values evolving in time as quantities carrying diagnostic information. To prove the usefulness of singular values for this purpose many numerical simulations have been conducted. It has been proved that when observing changes of singular values obtained from SVD during the lifetime of a machine, the appearance of reversal points must be taken into account. The appearance of such points may prove that the symptom values change abruptly (*eg. structure cracking*). The appearance of such an abrupt change can easily be overlooked because of variable working parameters of the machine, which influence the values of measured symptoms and generalized symptoms after SVD. Singular values are almost insensitive to changes of working parameters, so it is easier to pick out such changes in their evolution than directly in symptoms. The paper also presents an example of application of the proposed method for real diagnostic data obtained from ball bearings.

Keywords: vibroacoustic diagnostics of machines, SVD, singular values.

ZASTOSOWANIE EWOLUCJI WARTOŚCI SZCZEGÓLNYCH W WIELOSYPATOMOWEJ DIAGNOSTYCE MASZYN

Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwość obserwacji wartości szczególnych ewoluujących w czasie jako wielkości niosących informację diagnostyczną. Aby wykazać przydatność wartości szczególnych w tym zakresie dokonano wielu symulacji numerycznych. Wykazano w nich, że obserwując zmiany wartości szczególnych uzyskanych z rozkładu SVD w czasie życia maszyny, należy zwrócić uwagę na występowanie punktów zwrotnych. Występowanie tych punktów może świadczyć o skokowej zmianie wartości symptomów (*np. pęknięcia struktury*). Fakt wystąpienia takiego skoku może zostać łatwo przeoczony ze względu na zmienne parametry robocze maszyny, które z kolei wpływają na wartości mierzonych symptomów a także symptomów uogólnionych po rozkładzie SVD. Wartości szczególne są prawie nie wrażliwe na zmiany parametrów roboczych, tak więc łatwiej wychwycić tego typu skoki w ich ewolucji niż bezpośrednio w symptomie. W pracy przedstawiono także przykład zastosowania proponowanej metody dla rzeczywistych danych diagnostycznych pochodzących z łożysk tocznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna maszyn, rozkład SVD, wartości szczególne.

1. WPROWADZENIE

Diagnostyka techniczna maszyn jest podstawowym narzędziem w strategii utrzymania ruchu uwarunkowanej stanem technicznym. Często, w praktycznych zastosowaniach, dokonuje się diagnozy stanu lub jego prognozy bazując na pojedynczej mierze sygnału diagnostycznego. Gdy miara ta jest współzmiennicza z cechami stanu możemy ją nazwać symptomem. W przypadku gdy stan techniczny daje się określić wykorzystując jeden symptom proces diagnozy lub prognozy jest oczywisty i sprowadza się do badania relacji wartości aktualnej lub przyszłej (*prognoza*) symptomu z jego

wartością prewencyjnego alarmu, co pozwala uniknąć awarii jak i uszkodzeń następujących.

W przypadku jednoczesnej rejestracji wielu symptomów, co w wielu przypadkach złożonych maszyn jest konieczne, istnieje wiele innych metod określenia stanu bieżącego lub przyszłego. Można tutaj stosować wszelkiego rodzaju metody klasyfikacji opartej o przykłady uczące [1][2][3], modele sieci neuronowych (*np. [4]*), zasadę pesymistycznej oceny (przekroczenie przez którykolwiek z symptomów jego wartości granicznej wywołuje alarm) itp. Ostania z przytoczonych możliwości szczególnie spełnia swe zadanie, gdy posiadamy wiele symptomów selektywnie wrażliwych na poszczególne uszkodzenia.

Inne podejście do problemu diagnostyki wielosymptomowej zostało zaproponowane przez Cempla. Pierwotnie wykorzystywano do tego celu rozkład PCA [5], a następnie SVD [6][7][8][9]. W tym podejściu problem wielowymiarowej prognozy czy diagnozy można sprowadzić do problemu o mniejszym wymiarze poprzez zastosowanie kombinacji liniowej odpowiednich pierwotnych wartości symptomów z wykorzystaniem wag zawartych w odpowiednich wektorach szczególnych. Zgodnie z tym powstanie wtedy nowa macierz obserwacji przy czym ilość uwzględnionych nowych symptomów zależy od przyjętej za istotną liczby wartości szczególnych. W ten sposób możemy zmniejszyć rozmiar pierwotnej macierzy obserwacji zastępując pierwotne kolumny symptomów odpowiednimi kombinacjami liniowymi. Podstawy tej metody przedstawiono w kolejnym rozdziale. Następnie przedstawione zostaną wyniki dotyczące próby zastosowania ewolucji samych wartości szczególnych jako miar niosących informację diagnostyczną. Pierwsze próby z udziałem ewolucji wartości szczególnych były podjęte w [10] i dotyczyły symptomów maszyn pracujących w ruchu ciągłym przy zmiennym obciążeniu. Uzyskane wyniki były zadziwiające ze względu na niewrażliwość wartości szczególnych na obciążenie. W związku z tym postanowiono bliżej przebadać problem na symulowanych symptomach oraz innych obserwacjach symptomów.

2. WYKORZYSTANIE ROZKŁADU SVD W DIAGNOSTYCE WIELOSYMPTOMOWEJ

Podstawą omawianej metody jest symptomowa macierz obserwacji **SOM** (ang. *Symptom Observation Matrix*) - patrz np. praca [8]. Opisowane podejście umożliwia wydobywanie informacji o rozwijających się uszkodzeniach w oparciu o sukcesywnie dopisywane do macierzy wierszowych wektorów symptomów. Dyskretne odczyty tego wektora są realizowane z krokiem $\Delta\theta$ czasu życia maszyny θ ($0 < \theta < \theta_p$ gdzie θ_p jest czasem prewencyjnego wyłączenia) i tworzą opisywaną macierz **SOM** o p wierszach. Ostatnia dostępna informacja odnosi się do chwili $p\Delta\theta$.

Sposób powstawania macierzy **SOM** zilustrowano na rysunku 1.

Kolejne realizacje pomiarów

$$\begin{array}{l} \text{Czas} \quad \theta_1 \\ \text{życia} \quad \theta_2 \\ \text{obiektu} \quad \theta_p \end{array} \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} \mathbf{v}_1 = [L_1(\theta_1) \dots L_n(\theta_1) S_1(\theta_1) \dots S_m(\theta_1)] \\ \mathbf{v}_2 = [L_1(\theta_2) \dots L_n(\theta_2) S_1(\theta_2) \dots S_m(\theta_2)] \\ \mathbf{v}_p = [L_1(\theta_p) \dots L_n(\theta_p) S_1(\theta_p) \dots S_m(\theta_p)] \end{array}$$

Dostępnych p realizacji

$$\mathbf{SOM} \quad \begin{bmatrix} \theta_1 & L_{11} & \dots & L_{1n} & S_{11} & \dots & S_{1m} \\ \theta_2 & L_{21} & \dots & L_{2n} & S_{21} & \dots & S_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_p & L_{p1} & \dots & L_{pn} & S_{p1} & \dots & S_{pm} \end{bmatrix}_{pxr}$$

Rys. 1. Dynamiczne tworzenie macierzy **SOM** poprzez dodawanie kolejnych wektorów obserwacji

Jak wynika z rys.1 macierz **SOM** może być rozumiana szerzej niż tylko macierz symptomów związanych z cechami stanu. Zgodnie z ideą zaproponowaną wyżej, elementami macierzy **SOM** mogą także elementy wektora logistycznego **L** związanego np. z wartościami parametrów pracy obiektu (np. *prędkość obrotowa, obciążenie, kąt ustawienia kierownicy w wentylatorze itp.*), a w szczególnym przypadku także miara eksploatacyjna (np. czas θ). Uwzględnienie wektora logistycznego (np. *parametrów sterowania*) **L** jest niekiedy istotne z punktu widzenia kompletności informacji w macierzy **SOM**, gdyż wiadomo, że wartości tych parametrów wpływają na obserwowane wartości symptomów. Tak więc, jeżeli wspomniane parametry ulegają zmianie obserwowane symptomy można wyrazić jako:

$$S = f(\xi(\theta), \mathbf{L}) \quad (1)$$

gdzie: **L** – wektor logistyczny, $\xi(\theta)$ - cechy stanu ulegające zmianie na skutek zużycia (np. wartość luzów, sztywność elementu konstrukcji itp.) zależne od czasu życia θ .

W przypadku gdy elementy wektora **L** podlegają zmianom w trakcie eksploatacji obiektu, a nie zostanie to uwzględnione w macierzy **SOM**, obserwowane zachowanie symptomów może być niewytłumaczalne. W przypadku obiektów, które nie podlegają sterowaniu lub wpływ zmian parametrów sterowania na obserwowane symptomy jest nieistotny, macierz **SOM** upraszcza się znacznie. Założenie o braku istotnego wpływu na wartości symptomów wymaga, aby obserwacji podlegały tylko „wyspecjalizowane” wielkości uzyskane np. na zasadzie selekcji częstotliwościowej.

Niestety często pełna informacja o wektorze **L** nie jest dostępna w systemie diagnostycznym a zmiany parametrów roboczych silnie kształtują zachowanie

symptomów. Nasuwa się więc pytanie czy mimo braku możliwości bezpośredniego uwzględnienia \mathbf{L} w macierzy obserwacji można w prosty sposób wyeliminować wpływ tych zmian na wartości symptomu a jednocześnie wyselekcjonować użyteczną informację diagnostyczną. Próba rozwiązanie tego problemu zostanie przedstawiona w rozdziale 3.

W pracy [8] zostało wykazane, iż maksimum informacji diagnostycznej możemy z macierzy \mathbf{SOM} uzyskać, jeśli wszystkie odczyty wstępnie wycentrować i znormalizować do wartości początkowej $S_m(0) = S_{0m}$ danego symptomu. Otrzymamy w ten sposób bezwymiarową symptomową macierz obserwacji:

$$\mathbf{O}^{(pr)} = [S_{nm}], \quad S_{nm} = \frac{S'_{nm}}{S_{0m}} - 1, \quad (2)$$

gdzie wartości z „*prim*” symbolizują pierwotne wymiarowe wartości mierzonych symptomów.

Do bezwymiarowej macierzy obserwacji zastosujemy procedurę rozkładu względem wartości szczególnych SVD, [11][12]. Łatwo wywnioskować, że możemy uzyskać tylko $u \leq r$ niezależnych informacji o rozwijających się uszkodzeniach F_t . Taki rozkład SVD możemy prowadzić po wykonaniu każdej obserwacji [8]: $n = 1, 2, \dots, p$, i w ten sposób śledzić ewolucję uszkodzeń $F_t(\theta_n)$ w obiekcie. Jedno uszkodzenie F_t może opisywać para wielkości po rozkładzie SVD, mianowicie [8][9]: SD_t oraz wartości szczególne σ_t . Pierwszy to uogólniony symptom uszkodzenia, który można nazwać nawet dyskryminantą i można ją otrzymać jako iloczyn prawostronny macierzy obserwacji i wektora \mathbf{v}_t [8][9]:

$$\mathbf{SD}_t = \mathbf{O}^{(pr)} \cdot \mathbf{v}_t = \sigma_t \cdot \mathbf{u}_t. \quad (3)$$

Teoretycznie dla danego czasu życia θ zaawansowanie uszkodzenia F_t może być odzwierciedlone przez wartość szczególną σ_t , natomiast chwilowa jego ewolucja przez dyskryminantę \mathbf{SD}_t [8][9].

Podobne rozumowanie można zastosować do ewolucji wielkości sumarycznych otrzymanych z SVD, a więc do sumy wszystkich dyskryminant \mathbf{SD}_t i sumy wszystkich wartości szczególnych σ_t , co może obrazować całościowe zaawansowanie zużycia w obiekcie, jak niżej:

$$\begin{aligned} SD(\theta) &= \sum_{i=1}^z |SD_i(\theta)| = \sum_{i=1}^z |\sigma_i(\theta) \cdot u_i(\theta)| \\ &\sim \sum_{i=1}^z |F_i(\theta)| = P(\theta) \\ DS(\theta) &= \sum_{i=1}^z |\sigma_i(\theta)| \sim \sum_{i=1}^z |F(\theta)_i| = F(\theta). \end{aligned} \quad (4)$$

Na podstawie (3) możemy zapisać, że pierwszy, najważniejszy uogólniony symptom uszkodzeń ma postać:

$$SD_{1j}(\theta) = \sum_i S_{ji}(\theta) v_{i1} \quad (5)$$

Zastosowanie skumulowanych symptomów zastępczych \mathbf{SD} , które stanowią liniową kombinację pierwotnych symptomów z odpowiednimi wagami wymaga niestety pewnych dodatkowych zabiegów. Aby móc wnioskować o stanie lub prognozować zmianę stanu wykorzystując tego typu symptomy konieczne jest wyznaczenie ich wartości granicznych. Ponieważ wartości takie nie istnieją, a warunkach przemysłowych nie można liczyć na przeprowadzenie diagnostycznego eksperymentu czynnego, pozostaje wykorzystać tutaj teorię niezawodności symptomowej [7].

3. WYKORZYSTANIE WARTOŚCI SZCZEGÓLNYCH DO DETEKCJI USZKODZEŃ

Wielokrotnie prezentowano już wyniki dotyczące wykorzystania symptomów uogólnionych \mathbf{SD} w diagnostyce wielosymptomowej [8][9]. Natomiast pozostaje pytanie czy istnieje możliwość wykorzystania informacji zawartej w samych wartościach szczególnych σ_t rozkładu SVD? Wartości szczególne zawierają w sobie informację o zmienności danych. Ponieważ z reguły w fazie przyspieszonego zużycia symptomy diagnostyczne gwałtownie zmieniają swój zasób informacji takie zmiany powinny być widoczne także w wartościach szczególnych. Należy zaznaczyć także, że wielu przypadkach mamy jednak do czynienia z multiplikatywnym wpływem parametrów roboczych na wartości obserwowanych symptomów [13]. W końcowej fazie eksploatacji przed awarią, przy dużych wartościach symptomów diagnostycznych, wpływ na nie parametrów roboczych będzie wyraźniejszy, a co za tym idzie, powinna zwiększyć się wariancja. Pierwsze próby wykorzystania wartości szczególnych wykonano w [10], gdzie okazało się, że są one jednak niewrażliwe na zmiany obciążenia.

Aby sprawdzić przydatność diagnostyczną wartości szczególnych dokonano szeregu symulacji. Przeprowadzone symulacje numeryczne w warunkach sterylnych, przy minimalizacji wpływu nieznanymi czynników (*które musiałby być uznane za losowe*), miały za zadanie wypracować sposób interpretacji informacji zawartej w wartościach szczególnych i skojarzyć ją ze zmianami wartości symptomów. W tym celu skupiono się na symptomach drganiowych i zrealizowano oprogramowanie pozwalające na generowanie sygnałów drganiowych charakterystycznych dla różnych zjawisk i uszkodzeń generowanych w maszynie wirnikowej z wałem łożyskowanych w dwóch łożyskowych kulkowych. Dodatkowo do

procedur wprowadzono możliwość uwzględnienia szumu addytywnego, oraz zmian obciążenia. W ten sposób uzyskano możliwość symulacji rzeczywistych pomiarów, łącznie z wykorzystaniem symptomów definiowanych w określonych pasmach częstotliwości¹. Symulacja taka pozwalała na uaktywnienie w danym momencie określonego typu uszkodzenia, przy czym model rozwoju symptomu z nim związanego miał charakter wykładniczy z arbitralnie narzuconymi parametrami. Zaproponowana metoda symulacji dawała przede wszystkim możliwość łatwego definiowania symptomów wyselekcjonowanych częstotliwościowo jak i dawała pełną kontrolę czynników wpływających na model. Zakładano przy tym, że jeśli powstające uszkodzenie zmienia w jakiś sposób zachowanie symptomu w rzeczywistości i wpływa to na wartości szczególne to także podobne jakościowo zmiany powinny być widoczne w przeprowadzonych symulacjach.

Symulacji dokonywano uwzględniając uszkodzenia rozwijające się od pewnej określonej chwili czasowej. Symulowano przypadki rozwoju jednego uszkodzenia, dwóch niezależnych uszkodzeń oraz braku uszkodzeń (*symptomy przez cały okres analizy wykazywały w przybliżeniu stałe wartości*). Rozpatrywano zarówno symptomy, które są selektywnie czułe na określone uszkodzenia (*filtracja wąsko pasmowa*), symptomy o charakterze ogólnym, które mogą zawierać jednocześnie informację o wielu uszkodzeniach (*w szerokim paśmie częstotliwości*), jak i ich kombinacje. Założono, że pierwsze z uszkodzeń objawia się w paśmie częstotliwości obrotowej wirnika, natomiast drugie w paśmie wokół drugiej harmonicznej. Sama interpretacja fizyczna nie była uznana tutaj za najważniejszą, choć symptomy można skojarzyć z rosnącym niewyrównoważeniem i np. pękaniem wału. W przypadku symptomów uogólnionych przyjęto miary takie jak: wartość skuteczna, szczytowa, średnia, współczynniki szczytu, luzu i impulsowości. Natomiast w przypadku symptomów selektywnych rozpatrywano wartość skuteczną, szczytową i średnią w różnych pasmach tak, aby w każdej symulacji występowała ta sama liczba miar (*eliminacja ewentualnego wpływu liczby rozpatrywanych symptomów na wyniki symulacji*). Dodatkowo w części symulacji uwzględniano dwustanową zmianę obciążenia. Dokonywano także zmian w sposobie pojawiania się uszkodzeń. Rozpatrywano tutaj dwa zasadnicze przypadki. W pierwszym z nich uszkodzenie rozwijało się monotonicznie, w drugim, najpierw następował jego skokowy wzrost (*np. pęknięcie*) i następnie monotoniczny rozwój. Tabela 1 przedstawia ogólne zestawienie zrealizowanych symulacji.

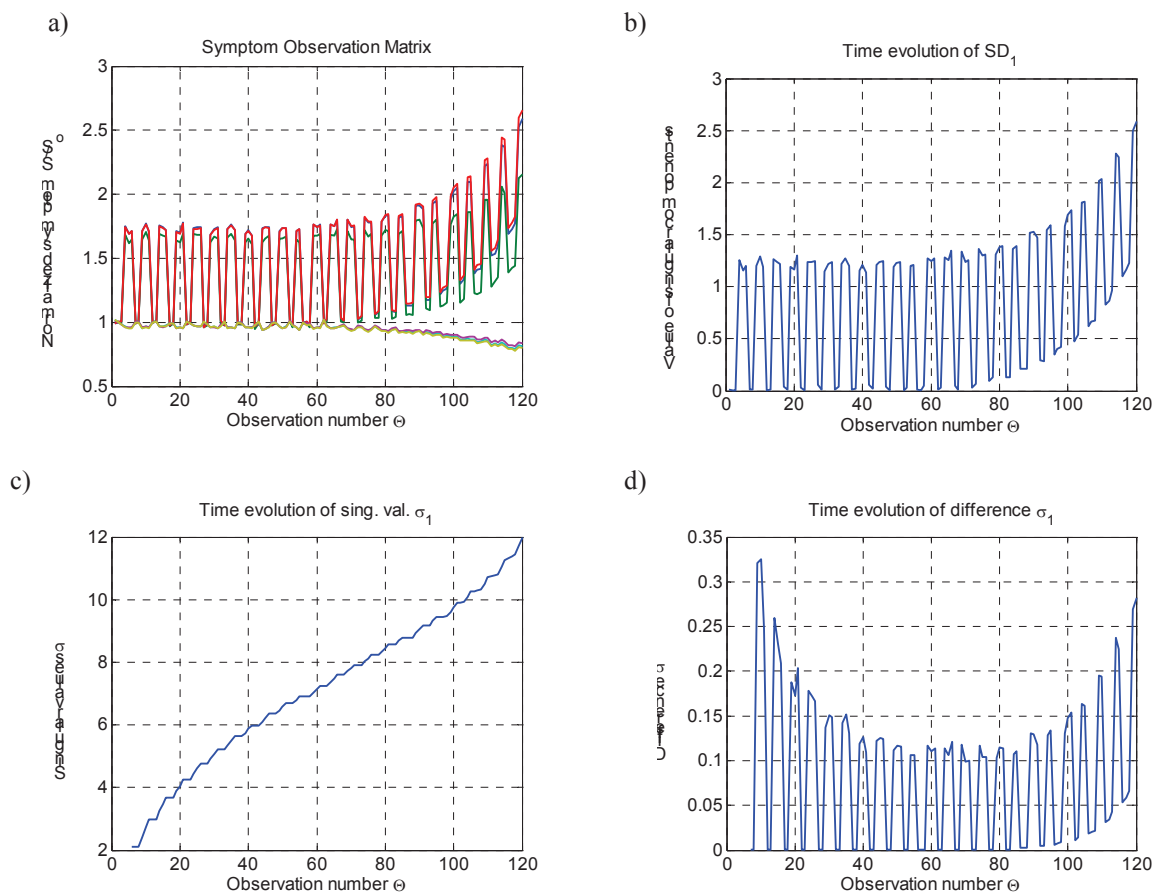
Tabela 1. Ogólny zakres zrealizowanych symulacji

Liczba niezależnych uszkodzeń	Symptomy	Zmiana obciążenia	Sposób symulacji uszkodzenia
Bez, 1 lub 2	Ogólne lub selektywne	Bez lub dwustopniowa	Gwałtowne (skokowe) pojawienie się i monotoniczny wzrost lub tylko monotoniczny wzrost

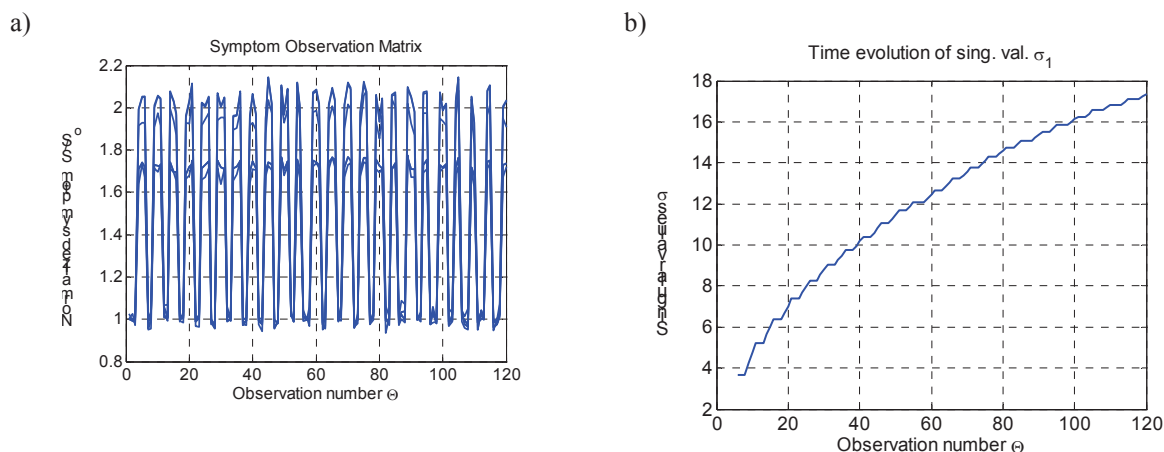
Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 2a widoczna jest ewolucja symulowanych wartości symptomu. Dodatkowo bardzo istotny jest tutaj wpływ zmian obciążenia. Choć wartości SD_1 mogą być dobrym symptomem uogólnionym to jak widać, są bardzo czułe także na zmiany obciążenia (rys. 2b). Tej cechy nie ma już ewolucja wartości szczególnej σ_1 , a przynajmniej wspomniany wpływ nie jest tak istotny, aby utrudniał modelowanie takiego przebiegu (rys. 2c). Co ciekawe po obliczeniu przyrostów kolejnych wartości σ_1 widoczny jest wyraźnie wpływ cyklicznych zmian obciążenia (rys. 2d). Można, więc powiedzieć, że przynajmniej σ_1 ma pewne właściwości kumulacyjne w stosunku wartości symptomu. Wynika stąd też, że sam przebieg wartości σ_1 umożliwia wygładzenie fluktuacji symptomu pozostawiając tylko ogólny trend, co mogłoby pozwolić na wykorzystanie σ jako nowego uogólnionego symptomu diagnostycznego.

Kolejne wyniki zarysowanej uprzednio symulacji zostały przedstawione na rysunkach 3a i 3b. Na rysunku 3 zaprezentowano dla porównania przypadek, w którym nie rozwija się żadne uszkodzenie a występują jedynie zmiany obciążenia. Porównując rysunki 3b i 2c można dojść do wniosku, że charakter zmiany są różne, jednak sama wartość σ_1 nie nadaje się bezpośrednio do oceny stanu technicznego. Jest to spowodowane faktem, że wzrost σ_1 wynika także z przyrostu liczby wierszy w macierzy **SOM** (*zwiększenie liczby obserwacji*) a nie tylko ze zmiany wartości symptomu. Jest to pewien ujemny aspekt symulacji, bowiem w normalnej diagnostyce eksploatacyjnej nie robimy pustych odczytów jeden po drugim, ale po określonym czasie $\Delta\theta$ co jest równoznaczne ze wzrostem zużycia eksploatacyjnego obiektu.

¹ W ten sposób wszystkie symptomy były liczone z symulowanego sygnału a nie symulowane niezależnie. Dodatkowo symulacja pozwoliła na uwzględnienie takich czynników jak charakterystyka filtru i brak doskonałej selekcji częstotliwościowej.



Rys. 2. Przykładowy wynik symulacji dla jednego rozwijającego się uszkodzenia i zmiennych parametrów obciążenia



Rys. 3. Przykładowy wynik symulacji dla przypadku braku rozwoju uszkodzenia

Można więc powiedzieć, że trend wartości szczególnej zawiera informację także o zaawansowaniu miary eksploatacji. Niemniej jednak dobrze że symulacja wykazała taką właściwość ewolucji wartości szczególnych σ_i . Na dodatek nie ma żadnego związku pomiędzy osiąganymi wartościami symptomów a wartościami szczególnymi. Stąd też ewentualne wykorzystanie wartości szczególnych jako źródła informacji musi

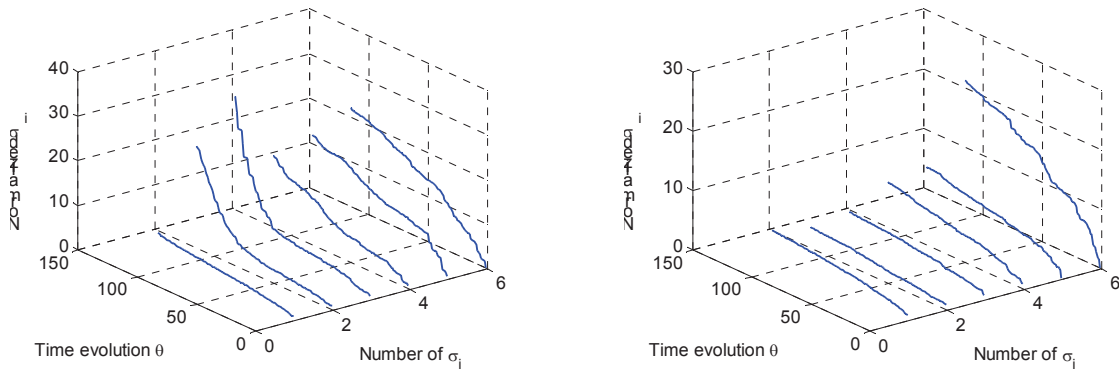
być oparte o inną ideę niż badanie relacji z wartościami granicznymi. Podobny wniosek możemy wyciągnąć z analizy, innych niż pierwsza, wartości szczególnych. Dodatkowo wrażliwość poszczególnych wartości szczególnych jest bardzo różna co ukazano na rysunku 4 obrazującym ich zmiany po normalizacji do wartości początkowej.

Innym ważnym spostrzeżeniem jest fakt, że na wartości osiągnięte przez σ silnie wpływa dobór

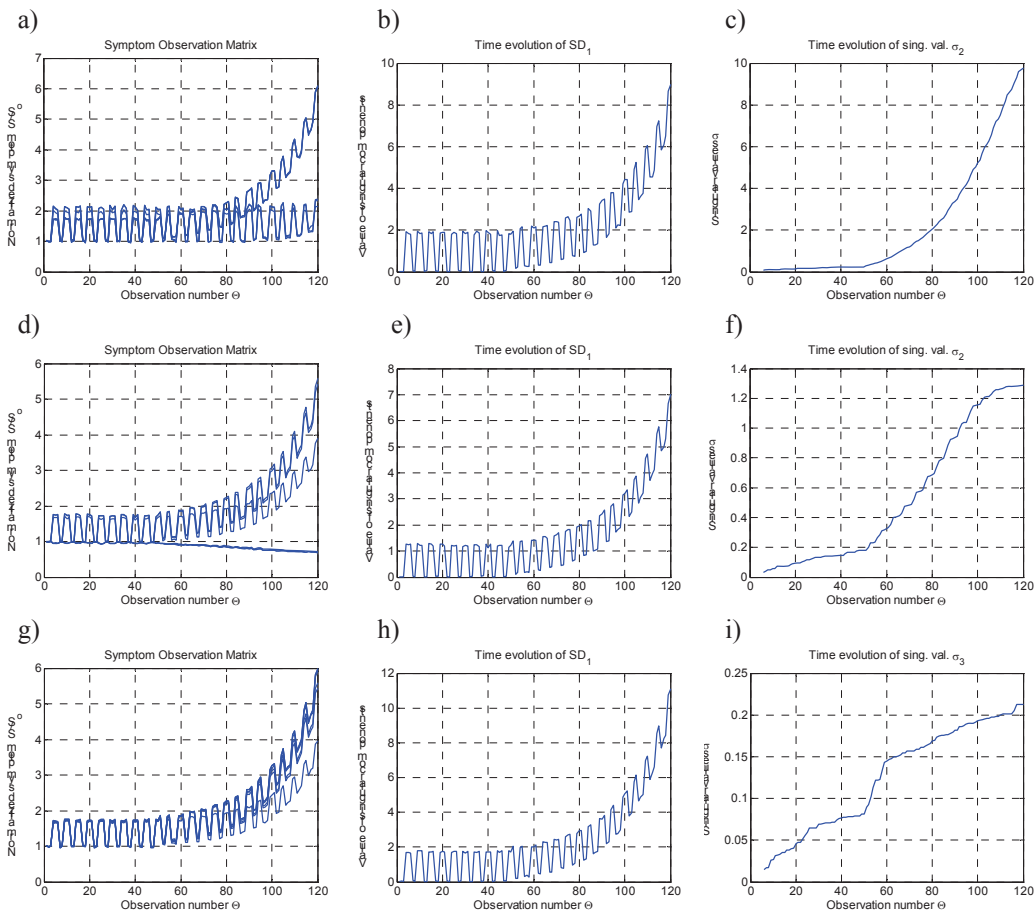
symptomów (liczba symptomów zawierających tą samą/podobną informację diagnostyczną). Wszystkie te czynniki powodują, że wykorzystanie ewolucji wartości szczególnych jako pewnego symptomu nie jest łatwe.

Sytuacja zmienia się, gdy rozpatrujemy przypadki, w których następuje skokowe zainicjowanie jakiegoś uszkodzenia a następnie jego monotoniczny rozwój. Przykład takiej symulacji przedstawiono na rysunku 5.

W przypadku obserwacji samych trendów pierwotnych symptomów, w przypadkach zmian obciążenia, taki gwałtowny wzrost może zostać niezauważony. W pierwszej kolumnie rysunku 5 przedstawiono symulowane symptomy diagnostyczne. W pierwszym wierszu mają one charakter wąskopasmowy, w drugim szerokopasmowy, w trzecim są kombinacją jednych



Rys. 4. Ewolucja kolejnych normalizowanych wartości szczególnych dla symptomów z rysunków 2a i 3a



Rys. 5. Porównanie możliwości wykrycia uszkodzenia pojawiającego się skokowo

i drugich. W każdym z wymienionych przypadków, w obecności zmian obciążenia fakt wystąpienia nagłego uszkodzenia (w symulacji taki skok wystąpił przy pomiarze nr 50) może zostać przeoczony. Natomiast może on być związany np. z nagłym pęknięciem, oderwaniem masy itp., które dalej będzie się rozwijać. Fakt ten może zostać także przeoczony w przypadku obserwacji wektorów \mathbf{SD} (kolumna 2 rysunku 5).

Skokowe zmiany widać natomiast w wartościach szczególnych objawiając się jako punkty zwrotne trendu (kolumna trzecia). Niestety pewną niedogodnością jest to, że zmiany są wyraźnie w różnych przebiegach wartości szczególnych: niekiedy w σ_2 , σ_4 a niekiedy w σ_3 lub innych. Ostatecznie zależy to od wykorzystanych symptomów. W przypadku przeprowadzonych symulacji zawsze występuje jednak jakaś wartość szczególna, w której omawiany skok symptomu jest znacznie łatwiej zidentyfikować niż w samym symptomie. Podobne informacje można odczytać w przypadku wystąpienia wielu uszkodzeń (rysunek 6). Jak wynika z rysunku 6 który dotyczy symulacji z dwoma niezależnie rozwijającymi się uszkodzeniami zainicjowanymi skokowo przy pomiarze nr 50 i nr 80, w σ_1 pojawiają się dwa punkty zwrotne. W σ_2 pojawiła się tylko informacja o drugim uszkodzeniu a w σ_5 przede wszystkim o pierwszym. I tak jak od tej pory są one zdecydowanie wyraźniej widoczne niż w pierwotnych symptomach.

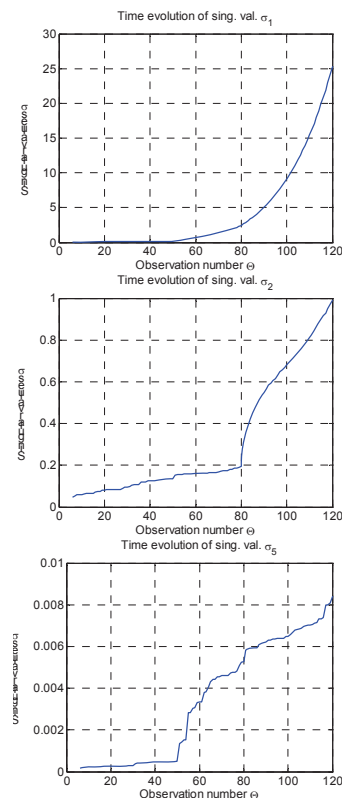
Z podsumowania wykrytych powyżej właściwości pojawia się możliwość diagnostycznego zastosowania ewolucji wartości szczególnych do detekcji gwałtownych zmian wartości symptomów, które na skutek zmian parametrów roboczych, mogą być mało widoczne bezpośrednio w obserwowanych miarach.

Takie gwałtowne skoki symptomu mogą wskazywać na nagłe pojawienie się określonych uszkodzeń. Należy zwrócić uwagę, że zakładamy, że po gwałtownej inicjalizacji uszkodzenia następuje w miarę monotoniczna zmiana symptomu (nie licząc wpływu zmian obciążenia). W przypadku dużych fluktuacji losowych obserwowanych symptomów taki sposób detekcji może być utrudniony i wywoływać fałszywe alarmy.

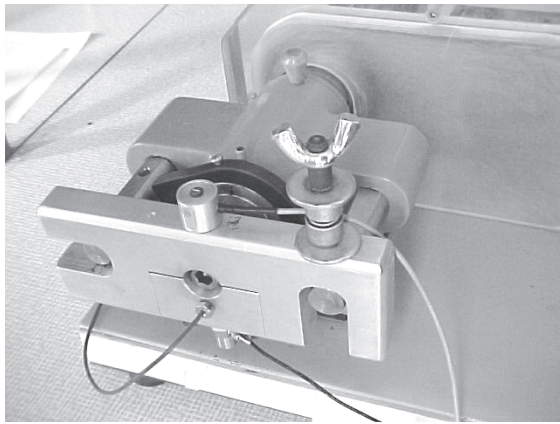
W celu wykorzystania proponowanej metody należy dokonać analizy zmian wszystkich wartości szczególnych, gdyż to, w której z nich pojawi się informacja diagnostyczna zależy od doboru symptomów. Wtedy pojawienie się punktów zwrotnych w krzywych ewolucji wartości szczególnych może być podpowiedzią o nagłym wystąpieniu uszkodzenia i skłaniać do zastosowania stosownych metod diagnozowania.

4. PRÓBA WYKORZYSTANIA WARTOŚCI SZCZEGÓLNYCH DO RZECZYWISTYCH DANYCH DIAGNOSTYCZNYCH

Aby zweryfikować możliwość zastosowania wartości szczególnych w zakresie przedstawionym wcześniej wykorzystano dane diagnostyczne pochodzące z eksperymentu przyspieszonego zużycia małowabarytowych łożysk tocznych. Podczas omawianego eksperymentu łożyska były nadmiernie obciążone oraz dodatkowo źle zmontowane (ściśnięte nadmierne w obudowie w jednym kierunku). Na rysunku 7 przedstawiono zdjęcie suportu stanowiska testowego, wraz z zamontowanym łożyskiem. Podczas eksperymentu w pewnej grupie badanych łożysk stosowano dodatkowo zmienne obciążenie w kierunku radialnym. Podczas eksperymentu dokonywano rejestracji sygnałów przyspieszeń drań, emisji akustycznej, temperatury łożyska oraz mocy pobieranej przez silnik. Z dostępnych sygnałów wyznaczono kilkanaście symptomów.



Rys. 6. Punkty zwrotne w ewolucji wartości szczególnych przy skokowej inicjalizacji symulowanych uszkodzeń

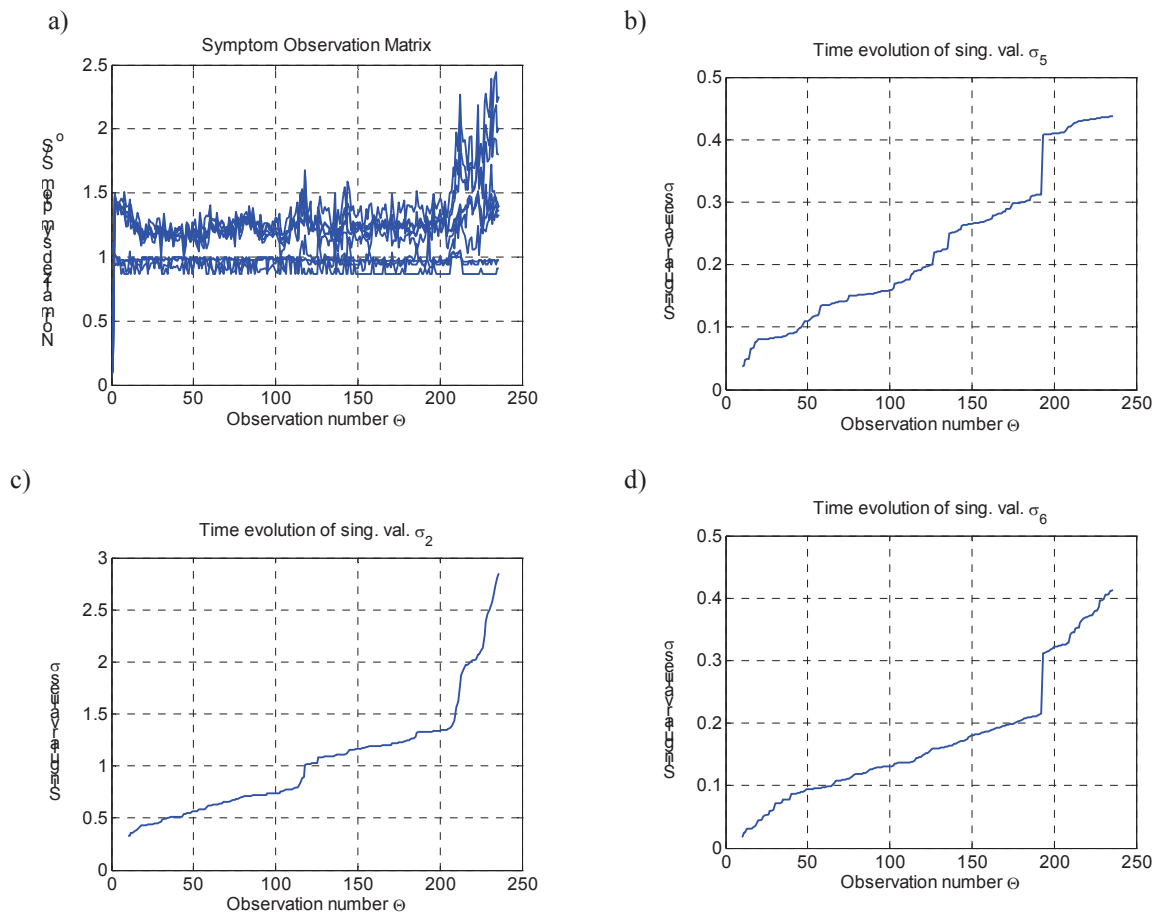


Rys. 7. Widok ogólny głowicy pomiarowej

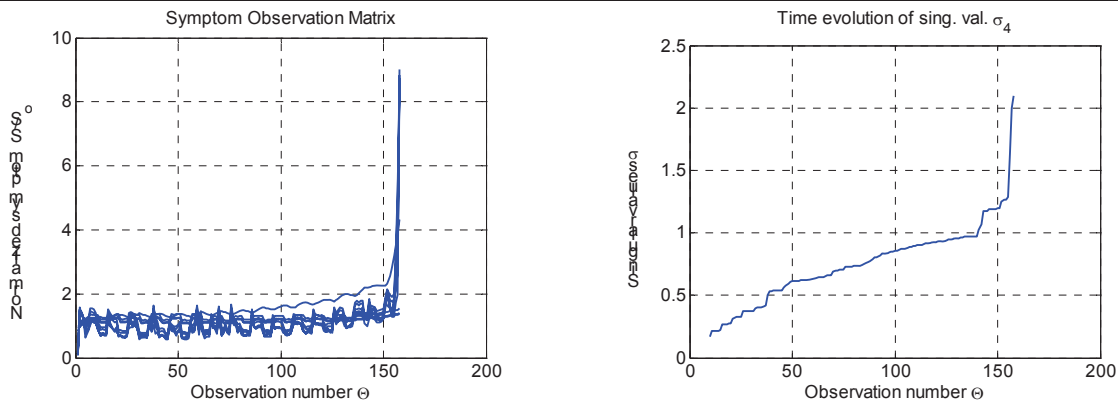
Na rysunku 8a przedstawiono przykładowe rejestracje dziesięciu symptomów dla przypadku braku zmian obciążenia łożyska. Z analizy symptomów wynika, że faza przyspieszonego

zużycia rozpoczęła się po ok. 200 pomiarze. Odpowiedni skok widać zresztą w przebiegu związanym z σ_2 (rys. 8c). Natomiast w przypadku σ_5 i σ_6 odpowiednie punkty zwrotne widoczne są przed tą chwilą (rys. 8b i 8d). Interesujące jest to, że bardzo niewielkim skokiem zareagował w tym czasie tylko jeden z symptomów, co można było przeoczyć analizując tylko symptomy.

Kolejny przykład na rysunku 9 ukazuje przykładowy wynik eksperymentu dla przypadku zmiennego obciążenia. W ewolucji σ_4 po 140 pomiarze widać wyraźny skok. Mógłby on zostać przeoczony, gdyby analiza opierała się tylko na obserwacji wartości symptomu (*ich reakcja była nieznaczna*). W tym momencie odnotowano także krótki dźwięk wskazujący na pęknięcie pierścienia zewnętrznego łożyska. Wyraźnie widać to tylko we wspomnianej wartości szczególnej.



Rys. 8. Przykładowe analizy dotyczące eksperymentu przyspieszonego zużycia łożysk tocznych



Rys. 9. Przykładowe analizy dotyczące eksperymentu przyspieszonego zużycia łożysk tocznych dla przypadku zmiennego obciążenia z pęknięciem pierścienia dla $N=140$

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując można stwierdzić, że obserwacja wartości szczególnych może być podpowiedzią o skokowym wystąpieniu uszkodzenia. Potwierdzają to symulacje jak i przeprowadzone eksperymenty. Warto dokonywać obserwacji wartości szczególnych w poszukiwaniu punktów zwrotnych, które mogą informować o tego rodzaju gwałtownych zmianach, które z kolei mogą zostać niezauważone w obserwacjach samych symptomów czy **SD**. Ma to szczególne znaczenie w przypadkach zmian obciążenia, które mogą zamaskować takie zjawiska. Niestety wnioskowanie w oparciu o wartości szczególne nie jest łatwe. Po pierwsze nie ma reguły, w której z nich pojawi się przydatna informacja. Przeważnie najbardziej czytelne są zmiany w różnych od pierwszej wartości szczególnej. Z drugiej strony czasami wspomniane skoki (*choć niewielkie*) pojawiają się przypadkowo lub przynajmniej w wynikach przeprowadzonego eksperymentu nie ma dowodów na skojarzenie ich z jakimiś uszkodzeniami. Wydaje się jednak, że informacja zawarta w wartościach szczególnych może być praktycznie wykorzystana do zwrócenia uwagi eksperta diagnostyki i do uruchomienia innych procedur diagnostycznych.

Praca naukowa została sfinansowana częściowo ze środków na naukę w latach 2009 – 2012 jako projekt badawczy 1751/B/T02/2009/37.

LITERATURA

- Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.), *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, Warszawa, WNT 2002.
- Tabaszewski M., *Prognozowanie w wielosymptomowej diagnostyce maszyn*, Rozprawy nr 446, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010, s. 153
- Kornacki J., Ćwik J., *Statystyczne systemy uczące się*, Warszawa, WNT 2005.
- Tabaszewski M.; *Wielosymptomowa, prognoza stanu i czasu do awarii z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Diagnostyka 2 (42)/2007, s. 43-48.
- Tumer I. Y., Huff E. M., *Principal component analysis of tri-axial vibration data from helicopter transmission*, 56th Meeting of the Society of Machine Failure Prevention Technology, 2002.
- Cempel C., *Innovative developments in systems condition monitoring*, Keynote Lecture, Proceedings of DAMAS'99, Dublin 1999.
- Natke H. G., Cempel C., *Model Aided Diagnosis of Mechanical Systems*, Springer Verlag, Berlin, 1997, p248.
- Cempel C., *Multidimensional Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6), 1291 – 1303.
- Cempel C., Tabaszewski M., *Multidimensional condition monitoring of the machines in non-stationary operation*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, 2007, pp 1233-1247.
- Cempel C., *The evolution of generalized fault symptoms and fault intensities as indicators of observation redundancy and coming system breakdown*, Mechanical Systems and Signal Processing, 25 (2011), p3116-3124.
- Kielbasinski A., Schwetlik H., *Numeric Linear Algebra*, WNT Press Warsaw, 1992, p502.
- Golub G. H., VanLoan Ch. F., *Matrix Computation*, III-rd edit, J Hopkins Univ. Press, Baltimore, 1996, p694.
- Gałka T., Tabaszewski M.; *An application of statistical symptoms in machine condition diagnostics*; Mechanical Systems and Signal Processing, vol 25, No. 1, (2011), str. 253-265