

Bogdan ŻÓŁTOWSKI

e-mail: bogzol@utp.edu.pl

Wydział Inżynierii Mechanicznej, UTP Bydgoszcz

Redundancja informacji w badaniach degradacji stanu

Wstęp

Ocena stanu obiektu za pomocą generowanych przez niego procesów fizycznych wymaga pozyskania istotnych informacji oraz właściwego skojarzenia parametrów funkcjonalnych ze zbiorem miar i ocen procesów wyjściowych [1–12].

Badania ewolucji stanu konkretnego obiektu, która zachodzi w cyklu życia i czasie $0 \leq \theta \leq \theta_b$ wyznaczanym przez kolejną planowaną lub wymuszoną naprawę obiektu w θ_b stanowią podstawę wielu poczynąń naukowych.

Proces zużywania się obiektu zazwyczaj jest wielowymiarowy, a wymiar przestrzeni uszkodzeń rośnie wraz ze stopniem skomplikowania konstrukcyjnego maszyny. Informacja diagnostyczna możliwa do pozyskania w badaniach stanu staje się nadmiarowa, skomplikowana wymiarowo i trudna do przetwarzania.

Dostępna już wielowymiarowa reprezentacja symptomowa stanu technicznego obiektu i możliwość ekstrakcji tej informacji *on-line*, stwarza nowe perspektywy w diagnozowaniu obiektów. Dotyczy to w szczególności nowych lub modernizowanych konstrukcji i nowych uruchomień obiektów innowacyjnych, bez żadnych doświadczeń eksploatacyjnych.

Celem pracy jest przedstawienie wielowymiarowego przetwarzania informacji diagnostycznej w metodzie SVD.

Wielowymiarowa obserwacja systemu

Obiekt złożony pracujący w czasie życia; $0 < \theta < \theta_b$, gdzie ewolucyjnie rozwija się kilka niezależnych uszkodzeń, o domniemanych intensywnościach $F_t(\theta)$, $t = 1, 2, \dots, u$, można opisać za pomocą wielu jednocześnie mierzonych sygnałów (symptomów). Rozwój uszkodzeń można uchwycić przez obserwację pola zjawiskowego systemu, gdzie tworzymy wierszowy wektor symptomów stanu technicznego; $[S_m] = [S_1, \dots, S_u]$, o różnej naturze fizycznej. Dla śledzenia zmian stanu technicznego obiektu wykonuje się kilkadziesiąt równo odległych odczytów wartości wektora w czasie; θ_n , $n = 1, \dots, p$, $\theta_p \leq \theta_b$. W ten sposób otrzymuje się kolejne wiersze symptomowej macierzy obserwacji (SOM) [2, 4].

Przetwarzanie danych z macierzy obserwacji prowadzi się dla wszystkich miar sygnałów jednocześnie. Wielowymiarowe przetwarzanie informacji zaprezentowane poniżej spotyka się w postaci procedur numerycznych w MATLABIE. Poniżej przedstawiono tylko podstawowe formalizmy matematyczne tej metody.

W metodzie SVD stosuje się procedurę rozkładu względem wartości szczególnych:

$$O_{pr} = U_{pp} \Sigma_{pr} V_{rr}^T, \quad (1)$$

gdzie:

T – transpozycja,
 U_{pp} – p -wymiarowa ortogonalna macierz lewostronnych wektorów szczególnych,
 V_{rr} – r -wymiarowa ortogonalna macierz prawostronnych wektorów szczególnych, oraz w środku diagonalna macierz wartości szczególnych Σ_{pr} o własnościach jak niżej:

$$\Sigma_{pr} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_l), \text{ przy: } \sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_l > 0 \quad (2)$$

oraz: $\sigma_{l+1} = \dots = \sigma_r = 0$, $l = \max(p, r)$, $u = \min(p, r)$.

Oznacza to, że spośród r mierzonych symptomów można uzyskać tylko $u \leq r$ niezależnych informacji o rozwijających się zmianach, które można utożsamiać z narastającymi uszkodzeniami w systemie Ft. Taki rozkład SVD macierzy obserwacji można prowadzić po wykonaniu każdej obserwacji; $n = 1, \dots, p$, i w ten sposób śledzić ewolucję uszkodzeń $F_t(\theta_n)$ w obiekcie [2, 4].

Badania wrażliwości na rozwijające się uszkodzenia wynika, że jedno uszkodzenie F_t może opisywać para nowych wielkości; SD_t oraz σ_t . Pierwszy to uogólniony symptom uszkodzenia t , co można nazwać dyskryminantą tego uszkodzenia i można ją otrzymać jako iloczyn prawostronny macierzy obserwacji i wektora v_t :

$$SD_t = O_{pr} v_t = \sigma_t u_t \quad (3)$$

A ponieważ wektory v_t i u_t unormowane są do jedności, to długość wektora SD_t równa jest jego normie energetycznej i wynosi:

$$\text{Norm}(SD_t) \equiv \|SD_t\| = \sigma_t \quad (4)$$

Zatem dla zadanego czasu życia θ zaawansowanie zużyciowe uszkodzenia F_t może być odzwierciedlone przez wartość szczególną $\sigma_t(\theta)$, natomiast chwilowa jego ewolucja przez dyskryminantę $SD_t(\theta)$. Postulujemy zatem równoważność nowych miar uzyskanych z SVD do charakterystyk przestrzeni uszkodzeń, w całym czasie życia θ obiektu:

$$SD_t(\theta) \sim F_t(\theta), \text{ z normą } \|F_t(\theta)\| \sim \|SD_t(\theta)\| = \sigma_t(\theta) \quad (5)$$

$SD_t(\theta)$ można by również nazwać profilem uszkodzenia, natomiast $\sigma_t(\theta)$ jego zaawansowaniem.

Podobne rozumowanie można zastosować do ewolucji wielkości sumarycznych; a więc do sumy wszystkich dyskryminant SD_t i sumy wszystkich wartości szczególnych σ_t , co może obrazować całościowe zaawansowanie zużycia w obiekcie i jego przebieg, jak niżej:

$$SD(\theta) = \sum_{i=1}^z SD_i(\theta) = \sum_{i=1}^z \sigma_i(\theta) u_i(\theta) = P(\theta) \quad (6)$$

$$DS(\theta) = \sum_{i=1}^z \sigma_i(\theta) \sim \sum_{i=1}^z F(\theta)_i = F(\theta)$$

Oczywiście czas życia jest tu wartościowany dyskretnie, z odczytami monitorowania dla kolejnych (możliwie) równoodległych θ_n .

Zmniejszenie redundancji obserwacji

Zasadniczym celem SVD jest wybranie maksymalnie informacyjnych symptomów mierzonych w danej sytuacji obserwacji diagnostycznej.

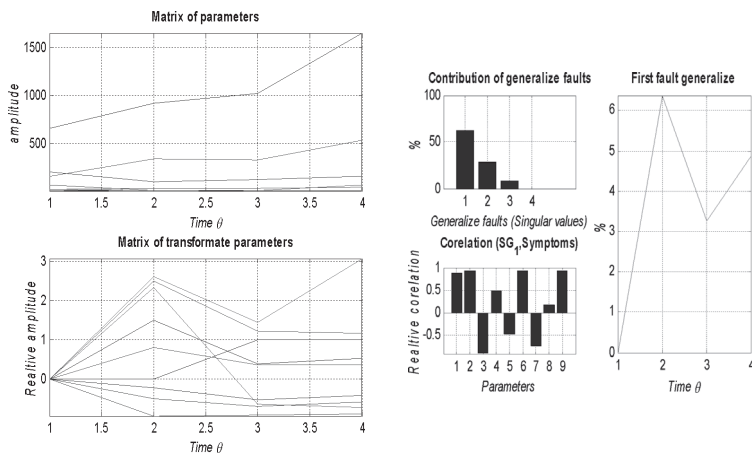
Jak wynika z dotychczasowych rozważań z macierzy obserwacji $O_{pr} = [S_{nm}]$, można zdefiniować dwie kwadratowe macierze kowariancji r i p wymiarowe, jak niżej (T – transponowanie macierzy, wektora):

$$W_1 = (O_{pr})^T O_{pr} \text{ oraz } W_2 = O_{pr} (O_{pr})^T \quad (7)$$

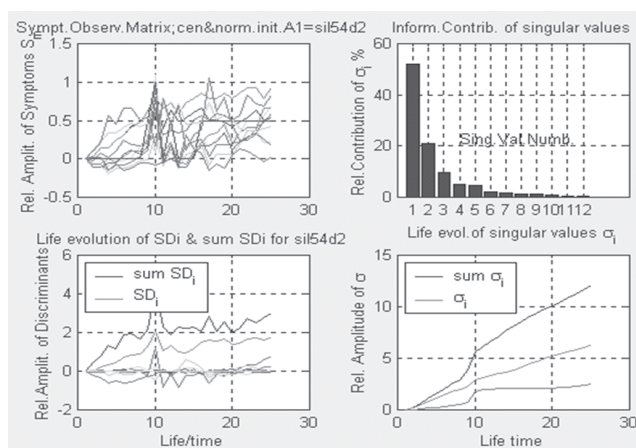
Rozwiązanie zagadnienia własnego tych macierzy (EVD) pokazuje, że można w ten sposób uzyskać poszukiwane wektory szczególnie uzyskane z SVD z macierzy obserwacji i kwadraty wartości szczególnych:

$$W_1 v_v = \sigma_v^2 v_v, \quad v = 1, \dots, r \text{ oraz } W_2 u_i = \sigma_i^2 u_i, \quad i = 1, \dots, p \quad (8)$$

Tak więc rozwiązując dwa zagadnienia własne (*Eigen Value Decomposition* – EVD) obu macierzy kowariancji zdefiniowanych na macierzy obserwacji, otrzymuje się to samo co z procedury SVD, jedyna



Rys. 1. Wyniki badań degradacji materiałów budowlanych [9] za pomocą 9 miar sygnału w metodzie SVD



Rys. 2. SVD w zastosowaniu do badań silnika [wg F. Tomaszewskiego]

różnica to kwadraty wartości szczególnych. Zamiast ich oryginalnych wartości występuje tu kwadratowanie, które faworyzuje wartości największe i stąd może być inna ocena istotności wkładu informacyjnego przez różne symptomy.

Wynik działania procedury SVD przedstawiono na rys. 1, wykorzystując wyniki badań zmian struktury materiałów budowlanych [9].

Pokazane na rys.1 po lewej zmiany wartości miar są tak rozrzucone, że aż niewidoczne. Ich normalizacja na lewym dolnym rysunku już pokazuje wszystkie mierzone miary i wskazuje już nawet na coś interesującego. Widoczne jedno rozwijające się uszkodzenie (powyżej 20%), stopień udziału poszczególnych miar oraz prognoza rozwoju uszkodzenia zostały pokazane na rys. 1 po prawej.

Innym przykładem jest eksperymentalna interpretacja efektów SVD, oparta jest na obserwacji diagnostycznej trakcyjnego 12 cylindrowego silnika *Diesla*, gdzie w jednym wybranym punkcie wykonywano co $\Delta\theta = 10$ tys. km pomiary kilkunastu symptomów drganiowych w całym cyklu życia. W sumie mierzono amplitudy 3 przyspieszeń, 3 prędkości, 3 przemieszczeń, 3 częstości *Rice'a*. Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań jednego z silników sil54d2, z pracy *F. Tomaszewskiego*.

Jak widać z lewego górnego obrazka 12 mierzonych symptomów tworzy gęstwinę informacji, która jednak po przetworzeniu przez SVD jest łatwo dekodowana na dwa główne rodzaje uszkodzeń, bo σ_1 i σ_2 to ca 50 i 20% ogółu informacji diagnostycznych w macierzy obserwacji (obrazek prawy górny) mierzonej jako iloraz wartości danego σ_i do sumy wszystkich wartości szczególnych. Do tego pierwsze uszkodzenie SD1 (lewo dół) prawie monotonicznie rośnie, natomiast drugie jest niestabilne i zaczyna rosnąć dopiero po dwudziestym pomiarze (200 tys. km), jak to widać również z przebiegu intensywności uszkodzenia σ_2 , w prawym dolnym rogu rys. 2.

W badaniach diagnostycznych skupiamy się na ogół, na najbardziej rozwiniętym uszkodzeniu, tutaj jest to SD₁, bo jak widać suma SD_i jest tu bardzo podobna. Zatem interesujące są pytania; jakie symptomy mierzone pierwotnie tworzą SD₁ i czy można jeszcze inaczej ocenić względne zaawansowanie pierwszych dwu uszkodzeń i wagę informacyjną mierzonych symptomów.

W systemie MATLAB[®] jest specjalna procedura **pcacov.m**, która w myśl systemowej definicji wyznacza składowe główne zadanej macierzy. Zatem procedura SVD w nowszych implementacjach programowych ma charakter bazowy i na jej podstawie tworzone są dalsze bardziej złożone, jak np. **pcacov.m**, które ujmują prawie wszystkie potrzebne elementy rozkładu macierzy obserwacji [2].

Wnioski

Problemy diagnozowania złożonych obiektów technicznych są ciągle rozwijane, a procedury pozyskiwania i przetwarzania informacji diagnostycznej są ciągle doskonalone. W tej pracy omówiono redundancję informacji dla wielowymiarowego badania stanu.

Automatyzacja procedur rozpoznawania stanu maszyn wymaga doskonalenia metodyki badania wielowymiarowego, co znajduje odbicie w procedurze SVD. Wyżej dokonano przeglądu możliwości zastosowań rozkładu względem wektorów szczególnych (SVD) do celów wielowymiarowej diagnostyki obiektów, zwłaszcza krytycznych.

LITERATURA

- [1] R. D. Bishop, G. M. Gladwell, S. Michaelson: Macierzowa analiza drgań. PWN, Warszawa, 1972.
- [2] C. Cempel: Multi Dimensional Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation. Symposium Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, 2002.
- [3] C. Cempel: Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 4 (44), 571 (1980).
- [4] C. Cempel, M. Tabaszewski, M. Krakowiak: Metody Ekstrakcji Wielowymiarowej Informacji Diagnostycznej. Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka, 2003.
- [5] J. Giergiel, T. Uhl: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa, 1990.
- [6] F. Morrison: Sztuka modelowania układów dynamicznych. WNT, Warszawa, 1996.
- [7] B. Żółtowski: Identyfikacja diagnostyczna obiektów technicznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 1 (105) (1996).
- [8] H. Tylicki, B. Żółtowski: Terra-technologie eksploatacji pojazdów mechanicznych. Wyd. ATR, Bydgoszcz 2004.
- [9] B. Żółtowski, S. Niziński: Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. ISBN-83-916198-3-4, Bydgoszcz-Sulejówkę, 2002.
- [10] B. Żółtowski: Badania dynamiki maszyn. ISBN-83-916198-3-4, Bydgoszcz, 2002.
- [11] B. Żółtowski, C. Cempel: Inżynieria diagnostyki maszyn. ITE Radom, 2004.
- [12] B. Żółtowski, S. Niziński: System informatyczny eksploatacji pojazdów mechanicznych. Wyd. PWSZ, Piła 2004.
- [13] B. Żółtowski, H. Tylicki: Wybrane problemy eksploatacji maszyn. Wyd. PWSZ, Piła 2004.

Praca wykonana w ramach projektu POIG nr WND-POIG. 01.03. 01-00-212/09.