

SKALOWANIE OBSERWACJI W WIELOWYMIAROWEJ DIAGNOSTYCE MASZYN NIESTACJONARNYCH¹

Czesław CEMPEL, Maciej TABASZEWSKI

Politechnika Poznańska

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,

fax. 61 6652309, czeslaw.cempel@put.poznan.pl, maciej.tabaszewski@put.poznan.pl

Streszczenie

Wiele obiektów krytycznych pracuje niestacjonarnie, a większość symptomów stanu technicznego zależy co najmniej od chwilowego obciążenia i warunków pracy. Zatem diagnostyka takich obiektów powinna mieć możliwość reskalowania odczytów symptomów do obciążenia znamionowego. Praca pokazuje taką możliwość dla przypadku wielowymiarowej symptomowej macierzy obserwacji, uzupełniając w ten sposób możliwości diagnozowania wielowymiarowego na przypadek niestacjonarnej pracy obiektów krytycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka wielouszkodzeniowa, symptomowa macierz obserwacji (SMO), rozkład wartości szczególnych-SVD, reskalowanie SMO.

MULTIDIMENSIONAL VIBRATION CONDITION MONITORING OF NONSTATIONARY SYSTEMS IN OPERATION BY SYMPTOM RESCALING

Summary

Many critical mechanical systems operate in a nonstationary regime (load), and many observed symptoms of its condition depend in a some way on a system load and/or environmental conditions. Hence the condition monitoring of a such systems ought to have some possibility of rescaling of observed symptoms to a **standard load** condition. This paper shows such a possibility of a symptoms rescaling in application to multidimensional vibration condition monitoring. It is shown on some real example of vibration condition monitoring, that rescaling of symptoms can make more reliable the assessment of current system condition, as well as its prognosis.

Keywords: symptom observation matrix, multi fault observation, singular value decomposition (SVD), symptom rescaling.

1. WSTĘP

Propozycja diagnostyki wielowymiarowej obiektów krytycznych, z zastosowaniem rozkładu względem wartości szczególnych (SVD) do transformacji informacji zawartych w symptomowej macierzy obserwacji, liczy sobie już kilka lat [1]. Również kilka lat liczy sobie propozycja wykorzystania uzależnienia wartości obserwowanych symptomów od warunków pracy nadzorowanego systemu, co opisano skrócie pojęciem **wektora logistycznego** [2]. Jak do tej pory jednak, wg wiedzy autorów, nie było próby wykorzystania tych dwu koncepcji jednocześnie, a to celem poprawienia dokładności oceny stanu i prognozy resztkowego czasu życia użytkowanego systemu. Koncepcja wielowymiarowości w diagnostyce była rozwijana przez pierwszego autora i jego zespół i stan jej rozpracowania przedstawiają przykładowo ostatnie prace [3], [4]. W pracach tych na podstawie wielowymiarowej symptomowej macierzy obserwacji (SMO) wyznacza się **uogólnione** symptomy uszkodzeń metodą SVD i składowych głównych (PCA), a przy użyciu koncepcji **niezawodności symptomowej** [8] dla takiego uogólnionego

symptomu, wyznacza się uogólnioną krzywą życia i wartość graniczną S_1 symptomu, niezbędna dla bezpiecznej eksploatacji obiektu.

W większości przypadków stacjonarnej pracy nadzorowanych obiektów to podejście wystarcza do wyekstrahowania jednego lub dwu dominujących uogólnionych symptomów uszkodzeń $F_i(\theta)$, rozwijających się **monotonicznie** w trakcie jego pracy. Jednak dla obiektów pracujących niestacjonarnie zastosowanie SVD do symptomowej macierzy obserwacji (SMO) nie daje monotonicznych uogólnionych symptomów uszkodzeń. Są one bardziej **wyglądzone** niż symptomy pierwotne, lecz dalej niestacjonarne. Przypomnijmy sobie, że oryginalna SMO jest skalowana (standaryzowana) w ten sposób, iż każda jej kolumna jest centrowana i normalizowana do **wartości początkowej**² symptomu, czyli do pierwszej obserwacji obiektu po uruchomieniu, wtedy kiedy to on znajduje się teoretycznie we wzorcowym stanie zdatności i **wzorcowym** stanie obciążenia. Lecz jak już wspomnieliśmy obserwowane symptomy zależą nie tylko od zaawansowania zużycia w obiekcie lecz także od aktualnego obciążenia procesem roboczym (wektor

logistyczny). Zachodzi zatem potrzeba wykorzystania tej zależności do poprawy monotoniczności uogólnionych symptomów zużycia ekstrahowanych z SMO dla obiektów pracujących przy obciążeniach niestacjonarnych. Taki jest główny motyw i idea obecnej pracy.

2. RESKALOWANIE SYMPTOMÓW I SYMPTOMOWEJ MACIERZY OBSERWACJI

Weźmy zatem pod uwagę jedną ze składowych wektora obserwacji S o numerze n i popatrzmy jak wygląda jego zależność od czasu życia dla obserwacji czynionej w czasie θ_p przy wartości L_p jedynej składowej wektora logistycznego symbolizującej wielkość obciążenia obiektu. Możemy to ująć matematycznie, a stosując rozkład w szereg Taylora otrzymamy jak niżej:

$$\begin{aligned} S_{pn}(\theta_p, L_p) &= S_{pn}[\theta_p, L_o(1 + \frac{\Delta L_p}{L_o})] \\ &\cong (1 + \frac{\Delta L_p}{L_o}) S_{pn}(\theta_p, L_o) \end{aligned} \quad (1)$$

co sprowadza się w tym przybliżeniu do **multiplikatywnego** wpływu wektora logistycznego na wartość symptomu.

Zatem dążąc do normalizacji n -tego odczytu symptomowego wektora obserwacji do stanu znamionowego obciążenia L_o , czyli do **reskalowanego** (znamionowego) odczytu $S_{pn}(\theta_p, L_o)$, powinniśmy odczytaną wartość symptomu pomnożyć przez czynnik reskalujący

$$I_p = (1 + \frac{\Delta L_p}{L_o})^{-1} \quad (2)$$

Oznacza to, że dla dodatniego przyrostu obciążenia $\Delta L > 0$ w stosunku do obciążenia znamionowego stanu zdatnego, odczytany symptom należy podzielić przez czynnik większy od jedności ($I_p < 1$) i odwrotnie dla spadku obciążenia $\Delta L < 0$, podzielić przez czynnik mniejszy od jedności.

Tyle jeśli chodzi reskalowanie pojedynczego symptomu S . Jeśli **założymy dalej**, że podobnie zachowują się pozostałe symptomy w wektorze obserwacji, to ten współczynnik możemy zastosować do całego wiersza macierzy obserwacji, czyli zagadnienie reskalowania pojedynczego symptomu możemy przenieść na reskalowanie symptomowej macierzy obserwacji. Niech zatem bieżący zapis SMO ma oznaczenie jak w poprzednich pracach [3]; $O_{pr} = [S_{mn}]$, czyli maksymalna liczba wierszy p ma bieżący wymiar $L, \dots m$ odczytów, przy kolejnych symptomach (kolumnach) $1, \dots n$. Zatem tworząc reskalowaną postać SMO powinniśmy jej oryginalną wartość wierszami mnożyć przez współczynniki typu (2). Z rachunku macierzowego [5] wynika, że winna to

być operacja lewostronnego mnożenia przez diagonalną macierz reskalującą o rzędzie równym liczbie wierszy SMO, wtedy bowiem dotyczyć to będzie każdego wiersza macierzy oddzielnie. W świetle powyższego, reskalowanie macierzy do warunków obciążenia znamionowego będzie przebiegać jak niżej;

$${}^R O_{pr} = L_{pp} * O_{pr} = [L_{mm}] * [S_{mn}], m=(1,p), \quad (3)$$

gdzie ujęcie macierzy w nawias kwadratowy oznacza bieżące jej tworzenie z obserwacji na obserwację. Tutaj też diagonalna macierz logistyczna reskalująca może mieć współczynnik diagonalny inny dla każdego wiersza;

$$L_{mm} = \text{Diag}(1 + \Delta L_m / L_o)^{-1}, m = (1,p), \quad (4)$$

a jeśli reskalowanie w danym pomiarze wektora obserwacji jest zbędne wtedy czynnik diagonalny jest każdorazowo jedynką.

To samo rozumowanie reskalowania można zastosować do innych składowych wektora logistycznego. Dla przypomnienia, w odniesieniu do maszyn w ruchu, składowe te mogą być liczbami charakteryzującymi następujące czynniki [8]; założony wskaźnik jakości projektu, wskaźnik jakości produkcji, wskaźnik sztywności fundamentowania, rozpatrywany wyżej wskaźnik obciążenia, wskaźnik jakości obsługi, wskaźnik jakości naprawy, i inne. Natomiast warunki pracy to wspomniane już **obciążenie** ruchowe, zmienne warunki zewnętrzne pracy jak **podmuchy** wiatru w elektrowni wiatrowej, **zanurzenie** i **przegłębienie** dla statków i okrętów, temperatura czynnika wejściowego, itp. Widać więc z powyższego, że procedurę reskalowania pierwotnej SMO możemy stosować nie tylko przy zmianie obciążenia, także zmiennych warunków otoczenia, a w odniesieniu do niektórych składowych, takich jak np. jakość napraw, możemy nawet reskalować odczyt wyjściowy (znamionowy) wektora symptomów po kolejnej naprawie obiektu.

3. EKSTRAKCJA I INTERPRETACJA INFORMACJI DIAGNOSTYCZNEJ Z MACIERZY OBSERWACJI

Zatem przypomnijmy; obserwujemy stan złożonego obiektu krytycznego, który może przejawiać swe zużycie rozwojem różnych uszkodzeń³ opisanych funkcjami intensywności $F_t(\theta)$, ($t=1,2,\dots$). Dla uchwycenia tej wielowymiarowej degradacji stanu obserwujemy obiekt w wielowymiarowej przestrzeni symptomów stanu, tworząc r wymiarowy wektor obserwacji. Realizacje tego wektora dla kolejnych momentów czasu życia obiektu θ_n ($n=1, 2,\dots$) tworzą naszą symptomowa macierz obserwacji - SMO.

Jak już wspominaliśmy najlepszą metodą ekstrakcji informacji jest zastosowanie do SMO rozkładu względem wartości szczególnych (SVD), lub też bardzo blisko związanej procedury zwanej analizą wg składowych głównych (PCA), która

jednak z racji na kwadratowanie wartości szczególnych [6] jest mniej wrażliwa na wyłapywanie mało energetycznych składowych **SMO**. Poszczególne kolumny (symptomy) tej macierzy są centrowane i normalizowane do wartości początkowej ($\theta=0$), tak że obecnie proponowany ciąg przekształceń wektora symptomów w reskalowaną macierz można zapisać jak niżej;

$${}^R O_{pr} = L_{pp} * O_{pr} = [L_{pp}] * [S_{nm}], S_{nm} = \frac{S_{nm}}{S_{0m}} - 1, (5)$$

gdzie pogrubione litery oznaczają pierwotnie mierzone składowe macierzy przed ich normowaniem.

Procedura SVD rozkładu powyższej macierzy **prostokątnej** daje nam lewostronne i prawostronne wektory szczególne i wartości szczególne σ_i , jak niżej [7]

$${}^R O_{pr} = U_{pp} * \Sigma_{pr} * V_{rr}^T, \quad (T - \text{macierz transponowana}).$$

Tutaj U_{pp} to kwadratowa macierz lewostronnych wektorów szczególnych, V_{rr} macierz prawostronnych wektorów szczególnych, Σ_{pr} diagonalna macierz wartości szczególnych, jak niżej

$$\Sigma_{pr} = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_l), \text{ and } \sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_u > 0, (7)$$

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

Z dotychczasowych prac autora i jego zespołu wiadomo, że najlepsza interpretacja diagnostyczna powyższej transformacji **SMO** wynika z dwu wielkości pochodnych otrzymanych z **SVD**. Pierwsza zwana, **uogólnionym symptomem uszkodzenia nr t**, otrzymana z macierzy obserwacji lub z iloczynu odpowiednich wartości szczególnych i wektorów własnych rzędu t , i przedstawia ona czasowy profil uszkodzenia; $P_t(\theta)$;

$$SD_t = {}^R O_{pr} * v_t = \sigma_t \cdot u_t \sim P_t(\theta), t = 1, \dots, u. (8)$$

Druga wielkość jest miarą energetyczną powyższego i dlatego przedstawia kumulacyjne zaawansowanie tego uszkodzenia, czyli

$$\text{Norm}(SD_t) \equiv \|SD_t\| = \sigma_t \sim F_t(\theta), t = 1, \dots, u. (9)$$

Oczywiście przy śledzeniu ewolucji uszkodzeń w obiekcie obydwie wielkości będą zależę od czasu życia obiektu θ , czyli będziemy mieli; $SD_t(\theta)$ i $\sigma_t(\theta)$. Monitorując zaś **sumaryczne** zaawansowanie uszkodzeń w użytkowanym systemie dogodnie jest śledzić sumy powyższych wielkości, jak niżej;

$$\text{Sum}SD_i(\theta) = \sum_{i=1}^z SD_i(\theta) = \sum_{i=1}^z \sigma_i(\theta) \cdot u_i(\theta) = P(\theta) (10)$$

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

Taka interpretacja diagnostyczna uogólnionych ewolucji uszkodzeń w obiekcie otrzymanych

z dekompozycji **SVD** macierzy obserwacji wydaje się być poprawna, co wynika np. z ostatniej pracy pierwszego autora [4], gdzie bazując na koncepcji niezawodności symptomowej pokazano wyznaczenie uogólnionej krzywej życia $S_u(\theta)$ i wartości granicznej S_r . Niżej postaramy się prześledzić podobne własności obiektów wynikające z zastosowania **SVD** przy dodatkowym użyciu **reskalowania** symptomowej macierzy obserwacji (**SMO**).

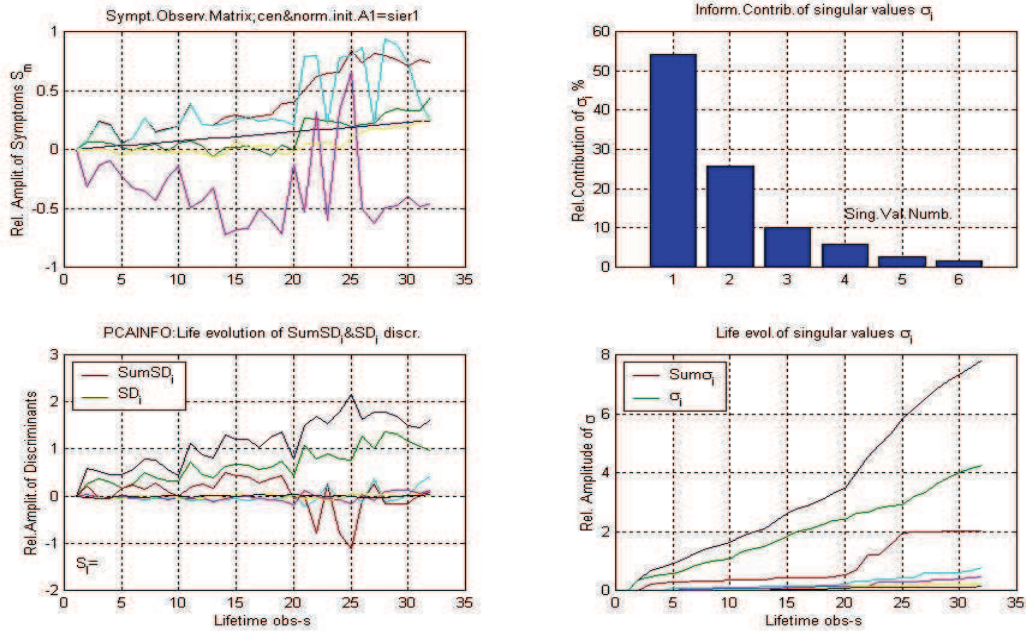
4. PRZYKŁADY RESKALOWANIA SMO W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW NIESTACJONARNYCH

Jednym z krytycznych urządzeń kopalń są wentylatory nadmuchu powietrza, wielkie maszyny o masie wirnika rzędu 3 ton. W czasie ich rutynowej diagnostyki drganiowej mierzy się tam amplitudy prędkości drgań obu łożysk w całym paśmie jak i w zakresie częstości obrotowych i łopatkowych, razem pięć wielkości drganiowych mierzonych co tydzień. Niestety, jak na razie nie kontroluje się **zapotrzebowania** powietrza, w związku z tym obciążenie maszyn (L) jest bardzo zmienne ale niewiadome. Mimo tego jak widać diagnostyka wielowymiarowa daje duże wygładzenie wahań symptomu uogólnionego, tak jak to można zauważyć z rysunku 1. Na górnym lewym obrazku tego rysunku mamy graficzny obraz macierzy obserwacji wraz z symptomem **czasu życia** (linia prosta). Na górnym prawym, mamy udziały informacyjne poszczególnych uogólnionych uszkodzeń, a na dolnym lewym i prawym te właśnie uogólnione uszkodzenia obliczone wg wzorów (8) – (10). Jak wynika z dolnego lewego obrazka wielkość $\text{Sum}SD_i$ jak i SD_1 (druga krzywa od góry) mają znacznie mniejsze oscylacje niż symptomy pierwotne widoczne, na lewym górnym obrazku Rys. 1. Tutaj nie stosowano reskalowania **SMO** tzn. w programie macierz reskalująca jest jedynkowa $L_v \equiv I$.

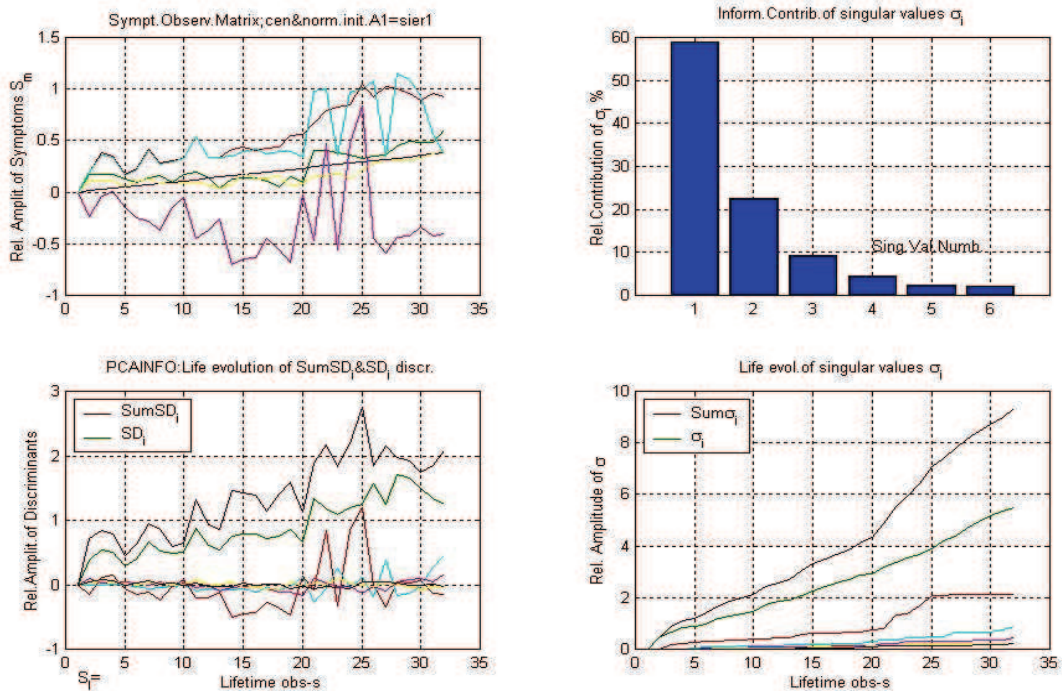
Załóżmy zatem, że odczyt pierwszy (pierwszy wiersz **SMO**) był wykonany przy dużym obciążeniu wentylatora $\Delta L > 0$, tak że czynnik reskalujący (2) będzie mniejszy niż jeden, niech więc $L_{pp} = \text{Diag}(0.9; 1; 1; \dots)$. Przy takiej jedynie zmianie wykonajmy powtórne obliczenia diagnostyki wielowymiarowej, tym samym programem jak poprzednio mianowicie; **pcainfo3.m**. Wyniki tych obliczeń przedstawia kolejny Rys. 2, skąd widać, że na każdym obrazku mamy do zanotowania istotną zmianę. Na lewym górnym obrazku rys. 2 widać mniejsze oscylacje początkowe symptomu ujemnego (po standaryzacji), zaś udział informacyjny pierwszej składowej głównej (obrazek prawy górny) zwiększył się prawie do 60%. Co więcej, oscylacje symptomów uogólnionych uszkodzeń (lewy dolny) przeszły prawie na stronę **dodatnią** przy większej dynamice $\text{Sum}SD_i$ jak i SD_1 . Podobnie zwiększyła

się dynamika wskaźników zaawansowania

uszkodzeń; $\text{Sum}\sigma_j$ jak i σ_j .



Rys. 1. Drganiowa diagnostyka wielowymiarowa wentylatora nadmuchu powietrza w jednej z kopalń krajowych, widoczne bardzo niestacjonarne obciążenie obiektu i wygładzone symptomy uogólnione



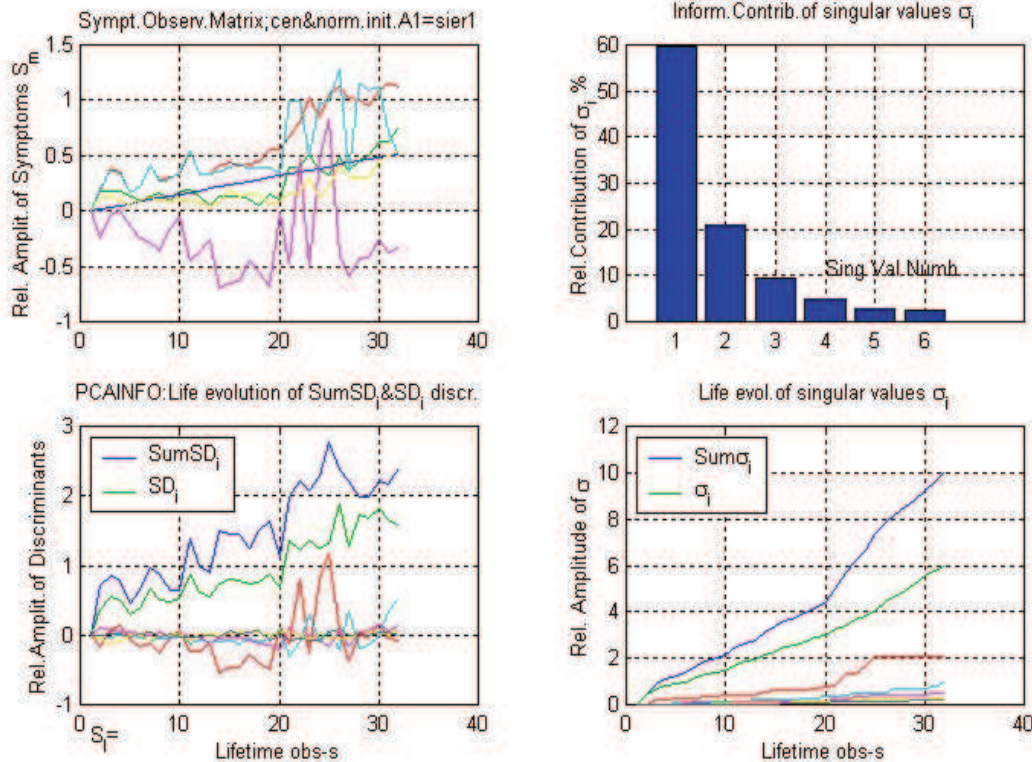
Rys. 2. Dane jak na rys.1 lecz z uwzględnieniem reskalowania pierwszej obserwacji; $L_{pp}=\text{Diag}(0.9;1;1\dots)$

Jak już wspomniano program **pcainfo3.m** oblicza znacznie więcej wielkości niezbędnych w diagnostyce; takich jak uogólniona krzywa życia, wartość graniczna i w każdej z tych wielkości są zmiany z tytułu reskalowania. Warto np. podać, że wartość graniczna S_f stabilizuje się już przy 25 obserwacji i zwiększa się z 2.8 do 3.2 (rys.4), a to jak łatwo zauważyć z tytułu zwiększonej dynamiki uogólnionych symptomów po reskalowaniu.

Analizując dalsze oscylacje symptomów drgań wentylatora (rys. 1 lewo góra) można dojść do przekonania, że oscylacje te zwiększają się po odczycie nr 20, osiągając głębokie minima co by oznaczało że obciążenie wentylatora w tych obserwacjach istotnie spadło. Zatem tu należałoby **dotatkowo** zwiększyć odpowiednie czynniki skalujące, np. do $l_p = 1.1$. W następnym więc podejściu, w ten sposób reskalowano obserwacje nr: 23; 26; 30; 31; 32; łącznie z poprzednim

współczynnikiem 0.9 dla pierwszej obserwacji. Wyniki takich obliczeń dla tego samego obiektu jak

na rysunkach 1 i 2 przedstawia kolejny rys. 3.



Rys. 3. Diagnostyka wielowymiarowa wentylatora jak na rys.1 i 2 lecz z reskalowaniem obserwacji L_{pp} ; obserwacje nr: (1)=0.9; (23)=1.1; (26)=1.1; (30-32)=1.1

Jeśli porównamy teraz Rys.1 i Rys. 3. to widzimy dalsze zmniejszenie oscylacji i zwiększenie dynamiki uogólnionych symptomów $SumSD_i$ jak i SD_i , dalej zwiększył się też udział informacyjny pierwszej składowej głównej σ_1 do 60% i dynamika wskaźników zaawansowania uszkodzeń: $Sum\sigma_i$ jak i σ_i do około 10. Widać więc z powyższego, że za pomocą operacji reskalowania obserwacji można "prostować" uogólnione symptomy uszkodzeń, zwiększać udział informacyjny pierwszych składowych głównych opisujących uszkodzenie, jak również zwiększać dynamikę i przebieg uogólnionej krzywej życia obiektu.

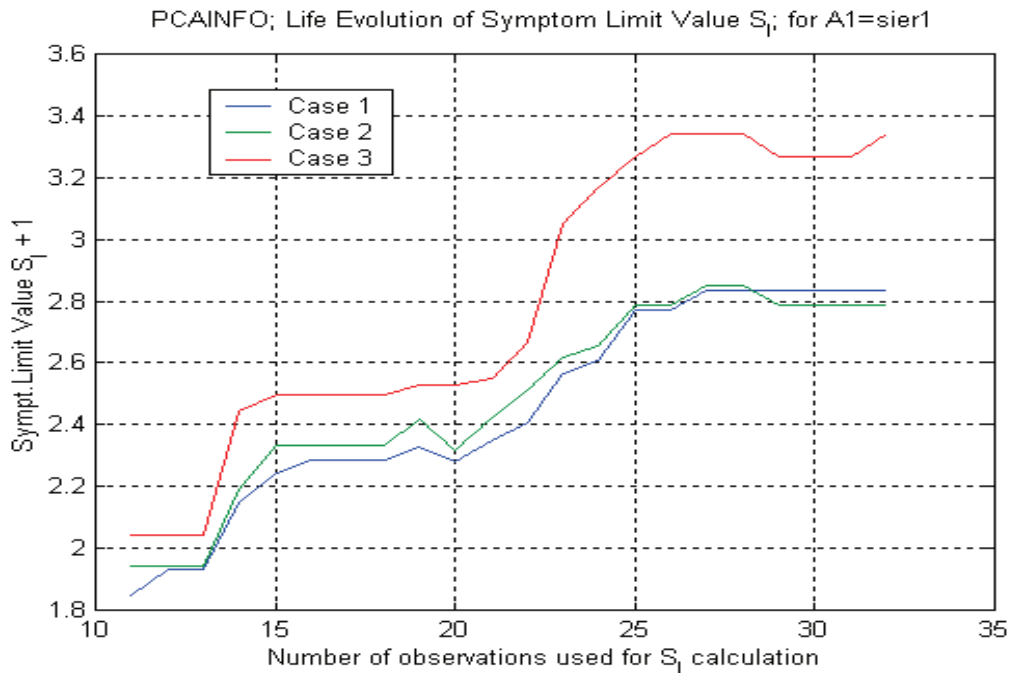
Warto jeszcze powiedzieć jak reskalowanie obserwacji wpływa na inne wielkości decyzyjne otrzymane w trakcie transformacji macierzy obserwacji, a wiodące do końcowej decyzji o zdolności obiektu do dalszej eksploatacji. Kluczową wielkością jest w tym względzie wartość graniczna S_i uogólnionego symptomu SD_i lub $SumSD_i$ obliczona przy zastosowaniu koncepcji niezawodności symptomowej [8].

Syntetyczny rysunek 4 przedstawia wpływ reskalowania na wartość graniczną w porządku jak na rysunku 1 do 3, czyli bez skalowania dla rys 1 (case 1) i i ze zwiększającym się zakresem reskalowania dla case 2 i case 3. Z powyższego

wynika, że dla obiektu **sier1** reskalowanie wartości początkowej nieznacznie zmienia przebieg i wartość S_i , dopiero znaczne reskalowanie kilku obserwacji (case 3) zmienia wartość i przebieg S_i .

Kolejna kwestia to zmienność **wkładu informacyjnego** pierwotnie mierzonych symptomów ze względu na tworzenie pierwszego symptomu uogólnionego SD_i , jak i na ogólny zasób informacji (overall) całego eksperymentu (macierzy obserwacji). Kolejny rysunek 5 przedstawia tą kwestię wg obliczeń dla danych jak na rys. 1 do 3 oznaczonych jako case 1 do case 3.

Jak wynika z rysunku 5 ogólny zasób zmienności pierwotnych symptomów nie zmienia się istotnie, zwłaszcza dla przypadku 3 (górny obrazek). Natomiast zmiana udziału informacyjnego dla symptomu uogólnionego SD_i jest też niewielka, bowiem maksimum jest tu rzędu 0.075 zawartości informacyjnej. Jest to jakby przesuwanie poziomu zerowego całego wykresu i dlatego największą zmianę można zanotować dla symptomów pierwotnych z małym wkładem informacyjnym. Jest to najbardziej widoczne dla reskalowania **pierwszego odczytu** ze współczynnikiem 0.9 (case 2).



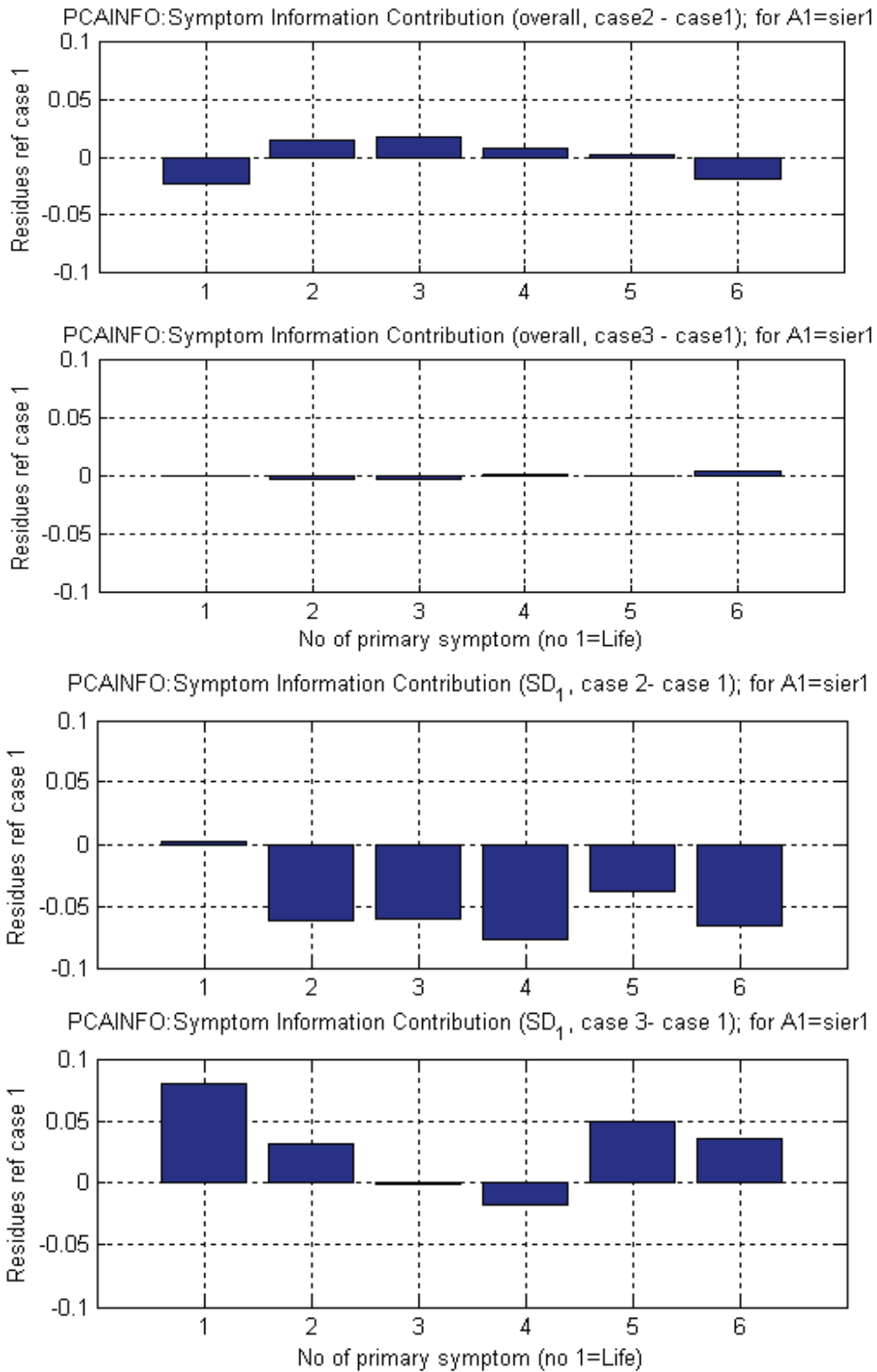
Rys. 4. Wpływ reskalowania na przebieg i wartość S_i symptomu uogólnionego obiektu **sier1** jak na rysunkach 1 (case 1) do 3 (case 3)

5. WNIOSKI

Koncepcja reskalowania symptomowej macierzy obserwacji w wielowymiarowej diagnostyce niestacjonarnych obiektów wydaje się być nośna, a pierwsze wyniki zachęcające do dalszej pracy w tym kierunku. Pokazano bowiem, że pierwotnie niestacjonarne odczyty obserwowanych symptomów mogą być w ten sposób wstępnie wygładzane, a składowe otrzymane główne (symptomy uogólnione) po transformacji **SVD** macierzy obserwacji stają się bardziej **monotoniczne** i uzyskują większą dynamikę. Zatem gdyby monitorować decyzyjny parametr wektora logistycznego (np. obciążenie) razem z odczytem wektora symptomów to uzyskamy podstawę do ewentualnego reskalowania całej macierzy obserwacji. Natomiast odnośne wartości współczynników można by wyliczać iteracyjnie startując z metody prób i błędów. Ogólnie, zależnie od potrzeb możliwe są również inne kryteria jakości reskalowania, np. szybkość ustalania się wartości granicznej S_b , czy też pojawienie się innego symptomu uogólnionego SD_2 , i inne. Warto się nad tym zastanowić projektując nowe eksperymenty diagnostyczne.

6. LITERATURA

1. Cempel C., Innovative developments in systems condition monitoring, Keynote Lecture, DAMAS'99, Dublin 1999.
2. Natke H. G., Cempel C., Model Aided Diagnosis of Mechanical Systems, Springer Verlag, Berlin, 1997.
3. Cempel C., Multidimensional Condition Monitoring of Mechanical Systems in Operation, Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6), 1291 – 1303.
4. Cempel C., Implementing Multidimensional Inference Capability in Vibration Condition Monitoring, Proceedings of Conference: Acoustical and Vibratory Surveillance, Senlis - France, October 2004.
5. Gere G. M., Weaver W., Matrix Algebra for Engineers, Van Nostrand, Princetown, 1965.
6. Natke H. G., Cempel C., The symptom observation matrix for monitoring and diagnosis, Journal of Sound and Vibration, 248, 597 – 620, 2002.
7. Kiełbasiński A., Schwielick H., Numeryczna Algebra Liniowa, WNT, Warszawa, 1992.
8. Cempel C., Natke H. G., Yao J. P. T., Symptom Reliability and Hazard for Systems Condition Monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No 3, 2000, pp 495-505.



Rys. 5. Całociowa (overall) i cząstkowa (dla SD_1) wrażliwość zawartości informacyjnej pierwotnie mierzonych symptomów macierzy obserwacji



Maciej TABASZEWSKI

Autor jest adiunktem w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej.

Specjalność: diagnostyka drganiowa maszyn, elementy sztucznej inteligencji w diagnostyce, programowanie obiektowe, modelowanie oraz prognozowanie symptomów diagnostycznych, przetwarzanie sygnałów.

Czesław CEMPEL – informacje o Autorze na str. 14.

¹ Prezentowane pierwotnie na Sympozjum Diagnostyki Maszyn Węgierska Górka 2005.

² Wtedy symptomy przedstawiają stan **bez zużycia**, odwrotnie niż w statystyce gdzie normuje się do wartości średniej.

³ Uszkodzenia te są różnie fizycznie i przestrzennie i na początku mogą być niezależne nawet w sensie matematycznym.