

**Henryk BOROWCZYK, Paweł LINDSTEDT, Janusz MAGIER**  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

## **DIAGNOZOWANIE KOMPLEKSOWE NA PODSTAWIE WSKAŹNIKA STANU TECHNICZNEGO**

### **Słowa kluczowe**

Diagnozowanie kompleksowe, wskaźnik stanu, charakterystyka progowa, sumaryczny sygnał diagnostyczny.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono definicję i sposób wyznaczania tribologicznego wskaźnika stanu technicznego. Pokazano wpływ charakterystyki progowej i rzeczywistego przebiegu sumarycznego sygnału diagnostycznego na wartość wskaźnika stanu. Wskazano na możliwość wyznaczenia czasu użytkowania, po którym sumaryczny sygnał diagnostyczny osiągnie wartość dopuszczalną. Przedstawiono zastosowanie tribologicznego wskaźnika stanu technicznego do diagnozowania autonomicznego i kompleksowego.

### **Wprowadzenie**

Zużywanie jest przyczyną degradacji stanu technicznego współpracujących elementów układu tribologicznego, co uwidacznia się zmianą wartości sygnałów diagnostycznych generowanych przez działający układ [6]. Sygnał diagnostyczny jest wielkością fizyczną, której zmiana jest powiązana ze zmianą stanu technicznego badanego układu [2, 3]. W celu ułatwienia analizy przeprowadza się normalizację sygnału [1, 5].

Wyznaczenie dopuszczalnej wartości sygnału diagnostycznego i określenie jego wartości progowej dla dowolnego czasu użytkowania pozwala na zdefiniowanie tribologicznego wskaźnika stanu technicznego, obserwację zmiany jego wartości w odniesieniu do progu diagnostycznego i niedopuszczenie do takiej degradacji stanu, która może zagrozić bezpieczeństwu użytkownika. Jest to szczególnie istotne w diagnostyce technicznej lotniczych silników turbiny.

### 1. Przesłanki wyznaczania wskaźnika stanu technicznego układu tribologicznego

Wyróżnia się następujące klasy sygnałów diagnostycznych: cząstkowe i sumaryczne (skumulowane).

Cząstkowy sygnał diagnostyczny  $d(\Delta\Theta)$  – jest funkcją zmiany stanu technicznego układu tribologicznego w czasie  $\Delta\Theta$  pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami.

Sumaryczny sygnał diagnostyczny  $d(\Theta)$  – jest funkcją stanu technicznego układu tribologicznego w chwili pomiaru. Zależy od stopnia zużycia elementów w ciągu całego okresu jego użytkowania: od początku użytkowania ( $\Theta = 0$ ) do czasu  $\Theta$ , w którym wykonywany jest pomiar.

Proponowany wskaźnik stanu technicznego wykorzystuje pojęcie charakterystyki progowej sumarycznego sygnału diagnostycznego. Jest ona modelem idealnego procesu zużywania – liniowej zależności między wartością sumarycznego sygnału diagnostycznego i czasem użytkowania.

Przebieg charakterystyki progowej sygnału sumarycznego oraz zależność pomiędzy wartością dopuszczalną tego sygnału  $d_{dop}$  a maksymalnym czasem użytkowania układu tribologicznego  $\Theta_{max}$  przedstawiono na rys. 1, gdzie:

$d_{dop}$  – wartość dopuszczalna sumarycznego sygnału diagnostycznego  $d(\Theta)$ ;

$d_{pr}(\Theta)$  – charakterystyka progowa sumarycznego sygnału diagnostycznego  $d(\Theta)$ ;

$d_{Pdop}(\Theta)$  – dopuszczalne przekroczenie charakterystyki progowej sumarycznego sygnału diagnostycznego  $d(\Theta)$ .

Pomiędzy tymi wielkościami zachodzą następujące zależności [4]:

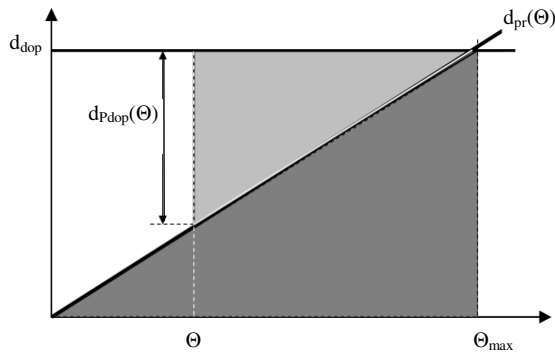
$$d_{pr}(\Theta) = d_{dop} \frac{\Theta}{\Theta_{max}} \quad \text{przebieg idealny} \quad (1a)$$

$$d_{pr}(\Theta) = (i \cdot \mu_{d(\Delta\Theta)} + a \cdot \sigma_{d(\Delta\Theta)} \sqrt{i}), \quad a \leq 3 \quad \text{przebieg rzeczywisty} \quad (1b)$$

$$d_{\text{dop}} = d_{\text{pr}}(\Theta_{\text{max}}) = n \cdot \mu_{d(\Delta\Theta)} + 3\sigma_{d(\Delta\Theta)}\sqrt{n} \quad (2)$$

$$d_{\text{Pdop}}(\Theta) = d_{\text{dop}} - d_{\text{pr}}(\Theta) \quad (3)$$

gdzie:  $\mu_{d(\Delta\Theta)}$ ,  $\sigma_{d(\Delta\Theta)}$  – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe ciągu wartości sygnału cząstkowego, których suma dla czasu użytkowania  $\Theta = i \Delta\Theta$  określa wartość sygnału sumarycznego  $d(\Theta)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $n = \frac{\Theta_{\text{max}}}{\Delta\Theta}$ .



Rys. 1. Charakterystyka progowa, wartość dopuszczalna i dopuszczalne przekroczenie charakterystyki progowej sumarycznego sygnału diagnostycznego

W miarę wzrostu czasu użytkowania  $\Theta$  wartość dopuszczalnego przekroczenia charakterystyki progowej  $d_{\text{pr}}(\Theta)$  będzie się zmniejszać. Wartością odniesienia jest wartość dopuszczalna sygnału  $d_{\text{dop}}$ , stała dla całego okresu użytkowania układu. Jeżeli sygnał diagnostyczny  $d(\Theta)$  przyjmuje wartości odpowiadające największej intensywności zużywania umożliwiającą osiągnięcie czasu użytkowania  $\Theta_{\text{max}}$  – czyli osiąga wartości progowe – to wskaźnik stanu technicznego układu tribologicznego może być określony następującą zależnością:

$$S_z(\Theta) = \frac{d_{\text{Pdop}}(\Theta)}{d_{\text{dop}}} = 1 - \frac{1}{\Theta_{\text{max}}} \cdot \Theta \quad (4)$$

Jeżeli wartość sumarycznego sygnału diagnostycznego  $d(\Theta)$  będzie dla danego czasu użytkowania  $\Theta$  większa od wyznaczonej dla tego czasu wartości progowej, to w czasie  $\Theta$  pojawiło się przekroczenie  $d_{\text{pr}}(\Theta)$ :

$$d_p(\Theta) = d(\Theta) - d_{pr}(\Theta) \quad (5)$$

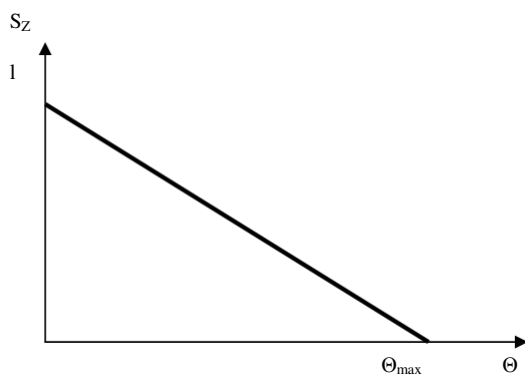
Pojawienie się przekroczenia charakterystyki progowej przedstawia rys. 3. Tribologiczny wskaźnik stanu technicznego po wystąpieniu przekroczeń charakterystyki progowej można zdefiniować następująco:

$$S_{zP}(\Theta) = \frac{d_{Pdop}(\Theta) - d_p(\Theta)}{d_{dop}} = \frac{d_{Pdop}(\Theta) - p_z(\Theta) \cdot d_{Pdop}(\Theta)}{d_{dop}} = \frac{d_{Pdop}(\Theta)[1 - p_z(\Theta)]}{d_{dop}} \quad (6)$$

gdzie:

$$p_z(\Theta) = \frac{d_p(\Theta)}{d_{Pdop}(\Theta)} = \frac{d(\Theta) - d_{pr}(\Theta)}{d_{dop} - d_{pr}(\Theta)} \quad (7)$$

jest **unormowaną liczbą przekroczeń** charakterystyki progowej sumarycznego sygnału diagnostycznego. Uwzględniając wyrażenie (4) otrzymano:

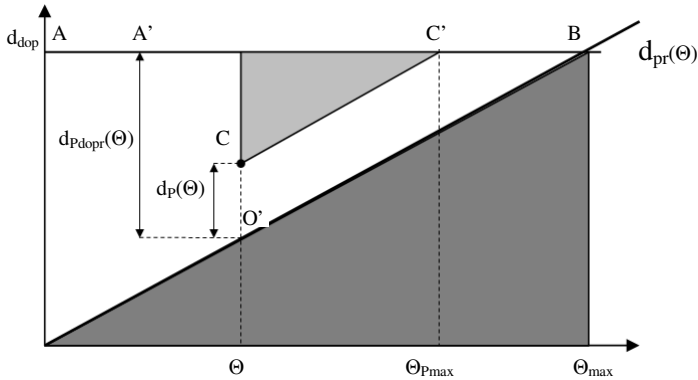


Rys. 2. Przebieg tribologicznego wskaźnika stanu technicznego wyznaczonego według zależności (4)

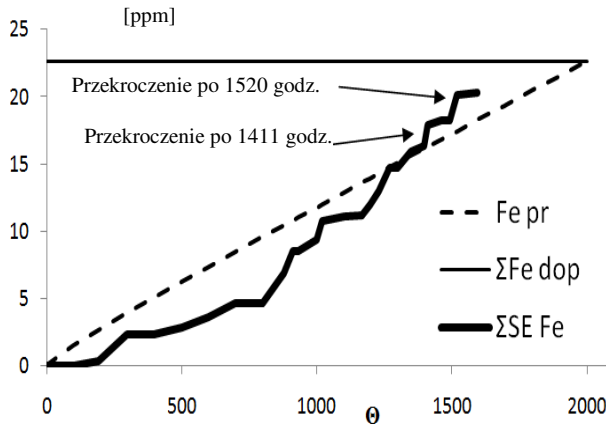
$$S_{zP}[\Theta] = [1 - p(\Theta)] \cdot S_z(\Theta) \quad (8)$$

Na rys. 4 przedstawiono wyniki diagnozowania tribologicznego turbinowego silnika śmigłowego Allison 250 z wykorzystaniem metody spektrometrii emisyjnej (SE). Określono zawartość żelaza w produktach zużycia zawartych

w oleju silnikowym w okresie od 0 do 1594 godz. nalotu. Przyjęto, że suma kolejnych wartości sygnału SE Fe (sygnał  $\Sigma$ SE Fe) jest funkcją stanu technicznego zużywających się elementów układu.

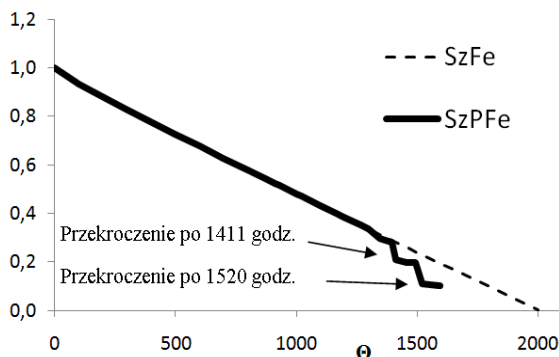


Rys. 3. Przekroczenie charakterystyki progowej sumarycznego sygnału diagnostycznego



Rys. 4. Sumaryczny sygnał diagnostyczny  $\Sigma$ SE Fe( $\theta$ ) na tle charakterystyki progowej  $Fe_{pr}(\theta)$

Na rys. 5 przedstawiono przebieg tribologicznego wskaźnika stanu  $S_{zP}(\theta)$  po wystąpieniu przekroczeń charakterystyki progowej sygnału (rys. 4) na tle przebiegu dla zużywania normalnego (wzorzec diagnostyczny):



Rys. 5. Wskaźnik stanu technicznego  $S_{zFeP}(\Theta)$  dla zużywania rzeczywistego i normalnego  $S_{zFe}(\Theta)$

gdzie:

$S_{zFe}(\Theta)$  – wskaźnik stanu technicznego dla zużywania bez przekroczeń wartości dopuszczalnych oddziaływań otoczenia (model diagnostyczny);

$S_{zPFe}(\Theta)$  – wskaźnik stanu technicznego dla zużywania rzeczywistego;

$\Sigma Fe_{dop} = Fe_{pr}(\Theta_{max} = 2000) = 22,6$  – wartość dopuszczalna sumarycznego sygnału diagnostycznego.

Pojawienie się przekroczenia charakterystyki progowej oznacza, że  $p(\Theta) > 0$  i wartość wskaźnika stanu  $S_{zP}(\Theta) < S_z(\Theta)$ . Pozostały czas użytkowania układu  $\Theta_{Pmax}$  do osiągnięcia przez sumaryczny sygnał diagnostyczny  $d(\Theta)$  wartości dopuszczalnej  $d_{dop}$  można wyznaczyć na podstawie zależności wynikających z rys. 3:

$$\frac{\Theta_{max} - \Theta}{d_{P\dop}(\Theta)} = \frac{\Theta_{Pmax} - \Theta}{d_{P\dop}(\Theta) - d_p(\Theta)} \quad (9)$$

Stąd:

$$\Theta_{Pmax} = \Theta_{max} - p(\Theta)(\Theta_{max} - \Theta) \quad (10)$$

Z przebiegu wskaźnika stanu  $S_{zPFe}(\Theta)$  dla zużywania rzeczywistego wynika, że dopuszczalne zużycie elementów układu tribologicznego zostanie osiągnięte wcześniej – po około 1900 zamiast 2000 godzinach użytkowania.

## 2. Diagnostowanie kompleksowe na podstawie tribologicznych wskaźników stanu technicznego wyznaczonych dla sumarycznych sygnałów diagnostycznych

W diagnostyce kompleksowej wykorzystuje się  $n$ -elementowy zbiór sygnałów  $D = \{d_1(\Theta), d_2(\Theta), \dots, d_n(\Theta)\}$ . Dla każdego sygnału wyznacza się wskaźnik stanu technicznego, uzyskując zbiór  $S = \{S_{z1}(\Theta), S_{z2}(\Theta) \dots S_{zn}(\Theta)\}$ . Wskaźnik stanu technicznego  $S_{zK}(\Theta)$  dla diagnostowania kompleksowego na podstawie sumarycznych zużyciowych sygnałów diagnostycznych przedstawia następująca zależność:

$$S_{zK}(\Theta) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n S_{zi}(\Theta)} \quad (11)$$

Wzorcem diagnostycznym diagnostowania kompleksowego jest charakterystyka  $S_{zK} = f(\Theta)$ , wyznaczona dla zużywania przebiegającego bez przekroczeń charakterystyk progowych sygnałów diagnostycznych należących do zbioru  $D$ .

Po wystąpieniu przekroczeń charakterystyki progowej dowolnego sygnału diagnostycznego ze zbioru  $D$  wyrażenie określające wartość wskaźnika stanu dla diagnostowania kompleksowego przyjmuje postać:

$$S_{zPK}(\Theta) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \{S_{zi}(\Theta)[1 - p_i(\Theta)]\}} \quad (12)$$

Jeżeli dowolny sygnał diagnostyczny  $d$  należący do zbioru  $D$  osiągnie wartość dopuszczalną  $d_{dop}$  po czasie użytkowania  $\Theta < \Theta_{max}$  i przypisany mu tribologiczny wskaźnik stanu technicznego  $S_z(\Theta)$  osiągnie wartość zero, to tribologiczny wskaźnik stanu technicznego dla diagnostowania kompleksowego  $S_{zPK}(\Theta)$  przyjmie wartość zero.

Analiza charakterystyki  $S_{zPK}(\Theta)$  nałożonej na charakterystykę  $S_{zK}(\Theta)$  umożliwia ocenę przebiegu degradacji stanu technicznego. Miarą nadmiernego zużycia elementów układu tribologicznego jest różnica:

$$R(\Theta) = S_{zPK}(\Theta) - S_{zK}(\Theta) \quad (13)$$

Utrzymanie  $R(\Theta) = 0$  w ciągu całego okresu użytkowania układu jest równoznaczne z osiągnięciem czasu użytkowania  $\Theta_{max}$  bez obawy zapoczątkowania zużywania awaryjnego któregośkolwiek z elementów układu.

### Podsumowanie

Przebieg wskaźnika stanu technicznego w funkcji czasu użytkowania  $\Theta$  układu jest – prostym do wyznaczenia i łatwym do zinterpretowania – wzorcem diagnostycznym procesu zużywania elementów układu tribologicznego. Wzo-

rzec wyznacza się dla zużywania przebiegającego bez przekroczeń charakterystyki progowej sygnału diagnostycznego związanego ze wskaźnikiem, stąd ma on postać liniową.

Wystąpienie przekroczeń charakterystyki progowej powoduje osiągnięcie przez sumaryczny zużyciowy sygnał diagnostyczny wartości dopuszczalnej po czasie użytkowania  $\Theta_{P_{max}}$  krótszym od ustalonej trwałości (resursu, żywotności)  $\Theta_{max}$ . Określenie tego czasu jest możliwe w oparciu o zależności charakteryzujące rzeczywisty (najczęściej nieliniowy) przebieg sumarycznego sygnału diagnostycznego.

Wskaźnik stanu technicznego jest miarą różnicy pomiędzy rzeczywistą wartością sygnału diagnostycznego a jego wartością dopuszczalną. Pokazuje, w którym miejscu pomiędzy stanem zdatnym a niezdatnym znajduje się rzeczywisty stan układu tribologicznego w każdej chwili użytkowania  $\Theta$ .

Na podstawie definicji wskaźnika stanu technicznego dla diagnozowania tribologicznego i funkcjonalnego można określić wskaźnik stanu dla diagnozowania kompleksowego z wykorzystaniem wielu sygnałów jednej lub kilku metod diagnostycznych.

Proponowany wskaźnik umożliwia prowadzenie eksploatacji układu tribologicznego wg stanu technicznego.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2011 jako projekt badawczy N504 015835.*

## **Bibliografia**

1. Borowczyk H., Lindstedt P., Manerowski J.: A Method of Parametric Evaluation of the Technical Object Reliability. Journal of KONBIN No 12 (9, 10), 2009.
2. Korbicz J. i in.: Diagnostyka procesów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
3. Kościelny J.M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
4. Leitner R., Zacharski J.: Zarys matematyki wyższej, cz. III. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
5. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy. Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa 2002.
6. Niziński S.: Elementy eksploatacji obiektów technicznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.

Recenzenci:  
**Piotr BIELAWSKI**  
**Jan SZYBKA**



## **A complex diagnosis based on technical condition index**

### **Key words**

Complex diagnosis, technical condition index, threshold characteristics, cumulated diagnostic signal.

### **Summary**

The paper presents a definition and method for technical condition index evaluation based on cumulated diagnostic signals. The proposed index is applied to compute diagnostic signal thresholds at the life-time cycle of the tribological system.