

**Henryk BOROWCZYK, Marek ZBOIŃSKI**  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

## **FORMALIZACJA WIEDZY W DIAGNOSTYCE TRIBOLOGICZNEJ UKŁADU ŁOŻYSKOWANIA**

### **Słowa kluczowe**

Układ łożyskowania, diagnostyka tribologiczna, system ekspertowy.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia formalizacji wiedzy eksperckiej w tribologicznej diagnostyce układu łożyskowania lotniczego silnika turbinowego.

### **Wprowadzenie**

W diagnostyce tribologicznej nośnikiem informacji o stanie układu łożyskowania silnika turbinowego są produkty zużycia znajdujące się w oleju smarującym pary tribologiczne. Wymaga to, aby układ olejowy silnika był typu zamkniętego z wymuszonym obiegiem oleju smarującego łożyska.

Układ łożyskowania wraz z układem olejowym są przedmiotem analiz i eksperymentalnych badań diagnostycznych przeprowadzanych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Uzyskany w ITWL dorobek teoretyczny i praktyczny [2, 4, 5, 7] oraz dane literaturowe [1, 3] stanowi wiedzę ekspercką, która może być zaimplementowana w ekspertowym systemie diagnostycznym wspomagającym ocenę stanu technicznego układu łożyskowania.

Zbudowanie systemu ekspertowego wymaga sformalizowania wiedzy eksperckiej i przedstawienie jej w postaci odpowiedniej dla stosowanych narzędzi informatycznych, np. SPHINX [6].

W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia formalizacji wiedzy eksperckiej w tribologicznej diagnostyce układu łożyskowania lotniczego silnika turbinowego na przykładzie silnika Allison 250.

## 1. Metody badawcze diagnostyki tribologicznej

Warunkiem wstępnym prawidłowego wnioskowania jest systematyczne i prawidłowe pobieranie próbek oleju zgodnie z ustaloną metodyką.

Badania składu chemicznego i koncentracji wybranych pierwiastków chemicznych w produktach zużycia par tribologicznych znajdujących się w oleju smarującym wykonuje się różnymi metodami. Każda z nich ma swoje wyspecjalizowane zakresy zastosowania, związane z analizą ilościową i jakościową.

W przypadku silnika Allison 250 badania prowadzone są z wykorzystaniem następujących metod:

- optycznej spektrometrii emisyjnej (OSE);
- fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej (XRF);
- ferrograficzną.

### *Metoda optycznej spektrometrii emisyjnej (OSE)*

W metodzie optycznej spektrometrii emisyjnej ocena składu chemicznego produktów zużycia oparta jest na analizie linii spektralnych produktów zużycia pobudzonych do emisji promieniowania elektromagnetycznego z zakresu widzialnego za pomocą łuku elektrycznego. Pomiar natężenia promieniowania wykonywany jest jednocześnie dla wszystkich badanych pierwiastków. W analizie ilościowej wykorzystuje się zależność między stężeniem badanego pierwiastka w próbce a natężeniem emitowanego promieniowania.

Spektrometr typu Spectroil M/C firmy Spectro Inc. umożliwia analizę składu chemicznego cieczy roboczej oraz produktów w nim zawartych dla 19 pierwiastków (Ag, Al, B, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Si, Sn, Ti, V oraz Zn) o wymiarach do 8–10  $\mu\text{m}$  i koncentracjach większych od 0,3  $\mu\text{g/g}$ .

### *Metoda fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej (XRF)*

Metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej analizuje się skład chemiczny produktów zużycia osadzonych na sączku (po przefiltrowaniu próbki oleju). Wzbudzone w próbce wtórne promieniowanie rentgenowskie rejestrowane jest za pomocą detektora proporcjonalnego. Ocenę jakościową badanej próbki uzyskuje się, analizując jej widmo promieniowania charakterystycznego, natomiast analizy ilościowej poszczególnych pierwiastków dokonuje się w oparciu o pomiary intensywności danej linii energetycznej. Analiza składu chemicznego możliwa jest dla produktów zużycia o wielkości cząstek zdefiniowanych przyjętą porowatością sączków filtrujących.

Badania metodą fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej wykonuje się za pomocą spektrometru fluorescencyjnego typu SPECTRON-U. Przyrząd został skalibrowany na 8 pierwiastków: Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti i Zn. Umożliwia określenie zawartości ww. pierwiastków o granulacji większej od 1,5  $\mu\text{m}$  i koncentracjach większych od 0,1  $\mu\text{g/g}$ .

### **Metoda ferrograficzna**

W badaniach wykorzystuje się pole magnetyczne o dużym gradiencie do rozdzielenia ferromagnetycznych cząsteczek produktów zużycia.

Główne zalety metody ferrograficznej:

- segreguje cząstki wg wymiarów, tworząc charakterystyczne wzory ekspozycyjne;
- umożliwia identyfikowanie różnych stopów w cząstkach produktów zużycia zarówno ferro-, jak i nieferromagnetycznych;

Analiza ferrogramu za pomocą mikroskopu optycznego pozwala (poprzez rozróżnienie: kształtu, składu, koloru oraz powierzchni metalicznych i niemetalicznych cząsteczek zużycia) na identyfikację przyczyny i typu zużywania, których zarejestrowanie inną techniką nie jest możliwe.

Badania ferrogramów są badaniami subiektywnymi. Dla zobiektywizowania wprowadzono bezwymiarowe wielkości określające liczbę cząstek dużych  $D_L$  (Large Diameter, większych od 5  $\mu\text{m}$ ) i cząstek małych  $D_S$  (Small Diameter, wymiary liniowe od 1 do 2  $\mu\text{m}$ ).

Na podstawie danych pomiarowych określone są następujące parametry:

- intensywność zużywania  $IZ$

$$IZ = D_L^2 - D_S^2 \quad (1)$$

- koncentracja produktów zużywania  $KPZ$

$$KPZ = D_L + D_S \quad (2)$$

- procentowy udział cząstek dużych w produktach zużywania  $\%D$

$$\%D = \frac{(D_L - D_S)}{(D_L + D_S)} * 100[\%] \quad (3)$$

## **2. Ekspertowy system diagnostyczny**

Ekspertowy system diagnostyczny ESDTrib-Allison250 układu łożyskowania silnika turbinowego typu Allison 250 opracowany został z wykorzystaniem systemu szkieletowego PC Shell [6]. Umożliwia on połączenie regułowej reprezentacji wiedzy oraz programowania proceduralnego.

Ekspertowy system diagnostyczny ESDTrib-Allison250 składa się z następujących modułów:

- modułu głównego (knowledge base) ESDTrib\_ALLISON250 zapisanego w pliku o nazwie ESDTrib\_ALLISON250.bw;
- źródła wiedzy (knowledge source) T\_MOA zapisanego w pliku o nazwie T\_MOA.zw;
- źródła wiedzy T\_XRF zapisanego w pliku o nazwie T\_XRF.zw;
- źródła wiedzy T\_Ferro zapisanego w pliku o nazwie T\_Ferro.zw.

Moduł główny zawiera deklarację źródeł wiedzy oraz blok sterowania *control*, który zarządza pobieraniem danych diagnostycznych oraz uruchamia proces wnioskowania.

Dane diagnostyczne – rezultaty bieżącego badania diagnostycznego układów tribologicznych wykonane rozpatrywanymi metodami – przechowywane są w pliku Excel o nazwie ESDTrib\_Allison250\_Dane.xls (arkusze – MOA, XRF i Ferro), skąd pobierane są przez system ekspertowy z wykorzystaniem mechanizmu dynamicznej wymiany danych (DDE).

Źródła wiedzy T\_MOA, T\_XRF i T\_Ferro zawierają deklaracje atrybutów wykorzystywanych w bazie wiedzy oraz zbiór reguł wnioskowania diagnostycznego.

### 3. Baza wiedzy

W skład bazy wiedzy systemu ekspertowego wchodzi następujące elementy:

- wyniki długotrwałych badań diagnostycznych;
- parametry progowe;
- baza faktów;
- baza reguł.

#### *Baza danych diagnostyki tribologicznej*

Na potrzeby diagnostyki tribologicznej silników typu Allison 250-C20 baza danych zawiera:

- szczegółowe dane o poszczególnych silnikach, zwłaszcza dane związane z układem łożyskowania;
- szczegółowe dane o próbkach oleju pobieranych z układu olejenia danego silnika, datę pobrania próbki oleju, czas pracy silnika;
- charakterystykę warunków pracy silnika – charakter lotu, przeciążenia, uszkodzenia, wpływ warunków pracy na układ, wymiana oleju itp.;
- zawartość pierwiastków określonych metodą optycznej spektrometrii emisyjnej;
- zawartość pierwiastków określonych metodą rentgenowskiej spektrometrii;

- współczynnik intensywności zużywania  $IZ$ ;
- koncentrację produktów zużywania  $KPZ$ ;
- procentowy udział cząstek dużych w produktach zużywania  $\%D$ .

Takie ujęcie danych pomiarowych pozwala na ich wykorzystanie do określenia klas procesu zużywania występujących w układzie oraz przewidywanego stanu układu łożyskowania silnika, a także niezbędnych przedsięwzięć profilaktycznych.

### **Parametry progowe**

W celu wyznaczenia wartości progowych koncentracji produktów zużywania w oleju smarującym przeprowadzono kompleksowe badania diagnostyczne podczas bieżącej eksploatacji silników. Zastosowano tzw. „metodę  $3\sigma$ ” bazującą na:

- średniej arytmetycznej koncentracji pierwiastka

$$\bar{x} = \frac{\sum x_n}{n} \quad (4)$$

- odchyleniu standardowym koncentracji pierwiastka

$$\sigma = \sqrt{(x_n - \bar{x})^2 / n} \quad (5)$$

Wyróżniono cztery klasy zużywania: normalne, podwyższone, wzmożone, awaryjne.

Proces zużywania uznaje się za normalny, gdy:

$$K_0 < \bar{x} + \sigma \quad (6)$$

podwyższony, gdy:

$$\bar{x} + \sigma < K_0 < \bar{x} + 2\sigma \quad (7)$$

wzmożony, gdy:

$$\bar{x} + 2\sigma < K_0 < \bar{x} + 3\sigma \quad (8)$$

awaryjny, gdy:

$$\bar{x} + 3\sigma < K_0 \quad (9)$$

gdzie  $K_0$  – zmierzona koncentracja danego pierwiastka.

### **Baza faktów**

Baza faktów tworzona jest na podstawie wyników badań produktów zużycia w próbce oleju wykonanych poszczególnymi metodami. Na pierwszym etapie

budowy bazy wiedzy ustala się nazwy wszystkich atrybutów, które umieszczane są w źródle wiedzy w bloku *faset*. Na przykład dla metody MOA:

- *m\_MOA\_xx* – atrybuty opisujące poziom zużycia pierwiastka *xx* na podstawie odniesienia bieżącej wartości koncentracji w próbce oleju do wartości progowych;
- *normalnyPoziomZuzycia\_MOA*, *podwyzszonyPoziomZuzycia\_MOA*, *wzmozonyPoziomZuzycia\_MOA*, *awaryjnyPoziomZuzycia\_MOA* – atrybuty grupowe opisujące zbiory pierwiastków o jednakowym poziomie zużycia;
- *m\_MOA\_xx* – atrybuty opisujące poziom zużycia pierwiastka *xx* na podstawie odniesienia bieżącej wartości koncentracji w próbce oleju do wartości progowych.

Atrybuty opisane są *fasetą* typu *val oneof*, która deklaruje dozwolony zbiór wartości atrybutów, np.:

*m\_MOA\_Ag*:

*val oneof { „normalny”, „podwyzszony”, „wzmozony”, „awaryjny” };*

lub *fasetą* typu *val someof*:

*normalnyPoziomZuzycia\_MOA*:

*val someof { „srebra Ag”, „glinu Al”, „bromu B”, „baru Ba”, „wapnia Ca”, „chromu Cr”, „miedzi Cu”, „żelaza Fe”, „magnezu Mg”, „manganu Mn”, „sodu Na”, „niklu Ni”, „fosforu P”, „ołowiu Pb”, „krzemu Si”, „cyny Sn”, „tytanu Ti”, „wanadu V”, „cynku Zn” };*

*Faseta val oneof* oznacza, że w bazie wiedzy atrybut *m\_MOA\_Ag* może wystąpić tylko raz, np.:

*m\_MOA\_Ag = „normalny”.*

Natomiast *faseta val someof* umożliwia wielokrotne wystąpienie atrybutu *normalnyPoziomZuzycia\_MOA* z różnymi wartościami z podanego zbioru, np.:

*normalnyPoziomZuzycia\_MOA = „srebra Ag”;*

*normalnyPoziomZuzycia\_MOA = „boru B”;*

*normalnyPoziomZuzycia\_MOA = „żelaza Fe”.*

Przypisanie atrybutowi wartości tworzy nowy fakt, który wprowadzany jest do bazy wiedzy

*addFact( \_m\_MOA\_Ag, „normalny” );*

W bazie wiedzy fakty dodawane są w sposób dynamiczny podczas wykonywania programu z bloku sterowania (**control**), który znajduje się w module głównym.

W analogiczny sposób postępuje się w przypadku pozostałych metod – XRF i ferrografii.

### **Baza reguł**

Reguły składają się z konkluzji i części warunkowej oddzielonej słowem *if*. Przesłanki w części warunkowej są połączone za pomocą operatorów logicznych AND (&) i OR (|) algebry Boole'a. Przykłady reguł:

1001: *normalnyPoziomZuzycia\_MOA* = „srebra Ag” *if* *m\_MOA\_Ag* = „normalny”;

2017: *dalszaEksploatacja\_Wstrzymac* = „tak” *if*

*m\_MOA\_Cu* = „wzmozony” | *m\_MOA\_Fe* = „wzmozony” | *m\_MOA\_Pb* = „wzmozony” | *m\_MOA\_Cu* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Fe* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Pb* = „awaryjny” | (*m\_MOA\_Ag* = „podwyzszony” | *m\_MOA\_Ca* = „podwyzszony” | *m\_MOA\_Mg* = „podwyzszony” | *m\_MOA\_Zn* = „podwyzszony”) & *probkaOleju\_Barwa\_JW* = „ciemna-brazowa” | *m\_MOA\_Ag* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Ca* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Mg* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Zn* = „awaryjny” | *m\_MOA\_Si* = „awaryjny”.

W wyniku opisanego zbioru reguł umożliwiających zidentyfikowanie wszystkich rozpatrywanych uszkodzeń powstaje algorytm wnioskowania przez system ekspertowy. Kolejność wnioskowania jest zgodna z kolejnością na liście reguł. Zmiana tego algorytmu jest możliwa poprzez zmianę kolejności reguł, co może mieć istotne znaczenie w przypadku zwiększania liczby reguł w miarę przyrostu wiedzy o funkcjonowaniu systemu w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

### **Podsumowanie**

Przedstawiona w pracy formalizacja wiedzy diagnostycznej polegająca na wprowadzeniu klas procesu zużywania (normalny, podwyzszony, wzmozony i awaryjny) oraz analogicznych poziomów progowych wyników badania produktów zużycia metodami MOA, XRF i ferrograficzną umożliwia zastosowanie jednolitego aparatu formalnego w budowie ekspertowego systemu diagnostycznego.

Przyjęta modułowa budowa bazy wiedzy, wykorzystująca źródła wiedzy dedykowane określonej metodzie diagnozowania ułatwia rozwój systemu, np. przez dołączenie nowych metod lub dopracowanie reguł wnioskowania dla metod istniejących.

Przedstawiony przykład zrealizowano, wykorzystując szkieletowy system ekspertowy PC\_Shell opracowany przez polskich specjalistów.

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

### **Bibliografia**

1. Barwell F.T.: Łożyskowanie. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
2. Borowczyk H., Szczepanik R.: Projekt ekspertowego systemu diagnostycznego układu łożyskowania turbinowego silnika odrzutowego. Zeszyty Na-

- ukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 10, Wyd. Politechnika Białostocka, Białystok 2002.
3. Cholewa W.: Wspomaganie procesu wnioskowania w diagnostyce technicznej. V Krajowa Konferencja Diag'2003, WAT, Warszawa 2003.
  4. Lewitowicz J., Bieńczak K.: Diagnostowanie systemów tribologicznych silników lotniczych. IV Konf. „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”, t. 3, s. 7–15, Międzyzdroje 1998.
  5. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: Diagnostyka silnika śmigłowego w inżynierijno-lotniczym otoczeniu. Prace Naukowe ITWL, Zeszyt nr 17, Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
  6. Michalik K.: PC\_Shell szkieletowy system ekspertowy. AI-TECH, Katowice 2006.
  7. Zboiński M.: Badania diagnostyczne układów tribologicznych w statkach powietrznych. Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, T. 6, Wyd. ITWL, Warszawa 2006.
  8. Zboiński M.: Baza danych diagnostyki tribologicznej silników Allison. ITWL, Warszawa 2011 (opracowanie wewnętrzne).

Recenzenci:  
**Wojciech CHOLEWA**  
**Mariusz OLSZEWSKI**

## **The knowledge formalisation in tribological diagnostics of bearing systems**

### **Key words**

Bearing system, tribological diagnostics, expert system.

### **Summary**

The paper presents the essential issues of knowledge formalisation in tribological diagnostics of turbine engine bearing systems. Knowledge consists of experimental data (optical spectroscopy, XRF, ferrography) and diagnostic parameter thresholds of four kinds of wear (normal, above normal, high, catastrophic). The fact base contains qualitative assessments of diagnostic parameters (the same as kinds of wear). Expert knowledge is formalised as a rule base. The fact and rule bases are implemented in application ESDTrib\_ALLISON250 using shell expert tools SPHINX.