

Henryk TYLICKI

OPTYMALIZACJA PROCESU ROZPOZNAWANIA STANU TECHNICZNEGO POJAZDÓW

Optimisation of a vehicle's technical state assessment process

Wstęp

Maszyny w każdej chwili znajdują się w pewnym określonym stanie, a sekwencje czasowe tych stanów rozpatruje się jako czas ich istnienia. Proces prognozowania stanu polega na przewidywaniu stanów pojazdu, które zaistnieją w przyszłości w chwilach $t_p > t_b$ (t_b – chwila diagnozy, t_p – jedna z chwil w przyszłości). Stanowi to główne zadanie rozpoznania stanu technicznego pojazdu. Przy jego rozwiązaniu istotne są następujące etapy:

- a) sformułowanie celu rozpoznania stanu technicznego pojazdu i określenie postaci diagnozy i prognozy;
- b) zmiana stanu technicznego pojazdu w czasie eksploatacji;
- c) opis stanu technicznego pojazdu za pomocą cech stanu oraz zależność pomiędzy cechami stanu i parametrami diagnostycznymi;
- d) rozwiązanie zadania rozpoznawania:
 - wybór parametrów diagnostyczno-opisujących aktualny stan i jego zmianę w czasie eksploatacji pojazdu,
 - wyznaczenie diagnozy i prognozy stanu pojazdu,
 - wykorzystanie informacji diagnostyczno-prognostycznej do podjęcia decyzji o terminie i zakresie obsługiwanego pojazdu.

Formułując te zadania optymalizacyjne należy posłużyć się wieloma kryteriami oceny.

Wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych

Zbiór parametrów diagnostycznych wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych. Na ogół, kryteriami są warunki niezależności, jedno-

Dr hab. inż. **Henryk Tylicki**, Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy.

znaczności i mierzalności parametrów. Należy traktować je jednak jako warunki wstępne.

Analizując prace z zakresu eksploatacji maszyn dotyczące problemu redukcji liczby parametrów diagnostycznych spotyka się takie, w których podejmuje się problem optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla potrzeb rozpoznawania stanu maszyn. Na podstawie przeprowadzonych badań [2], mających na celu potwierdzenie niektórych propozycji zawartych w tych pracach, stwierdzono, że wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych w procesie rozpoznawania powinno uwzględniać:

- zdolność odwzorowania zmian stanu maszyny w czasie eksploatacji;
- ilość informacji o stanie maszyny;
- odpowiednią zmienność wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji maszyny.

Odpowiednie algorytmy uwzględniające te postulaty przedstawiono poniżej jako metody, opracowane i zweryfikowane w pracy [2].

Metoda maksymalnej wrażliwości parametru diagnostycznego na zmianę stanu technicznego

Metoda polega na tym, że ze zbioru parametrów wyjściowych układu lub zespołu maszyny wybiera się ten parametr, który charakteryzuje się największą wartością wskaźnika a_j , uwzględniającego zależność parametrów od stanu:

$$a_j = \sum_{i=1}^k M(i, j); \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, \dots, m \quad (1)$$

gdzie:

$M(i, j) \in [M(i, j)]_{k \times m}$ – element binarnej macierzy diagnostycznej układu maszyny.

Wybór parametru y^* do zbioru parametrów diagnostycznych powinien sprowadzić się wówczas do wyboru y_j o maksymalnych wartościach a_j .

Metoda maksymalnej względnej zmiany parametru diagnostycznego

W metodzie tej wybiera się ten parametr diagnostyczny, który ma największą wartość wskaźnika k_j . Uwzględnia on średnią prędkość zmiany parametrów w przedziale czasu (t_1, t_b) . Określa się go według wyrażenia:

$$k_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j}, \quad b_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(t_{i+1}) - y_j(t_i)|}{(t_{i+1} - t_i) |y_j(t_1) - y_{j,g}|} \quad (2)$$

gdzie:

K – liczebność elementów szeregu czasowego w przedziale $[t_1, t_b]$.

Metoda maksymalnej pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego

Metoda polega na wyborze parametru dostarczającego największą ilość informacji o stanie maszyny. Parametr diagnostyczny ma tym większe znaczenie w określeniu zmiany stanu, im silniej jest z nim skorelowany i im słabiej jest skorelowany z innymi parametrami diagnostycznymi. Zależność tę przedstawia się w postaci wskaźnika integralnej pojemności parametru diagnostycznego h_j , który jest modyfikacją dokonaną dla potrzeb redukcji parametrów diagnostycznych (w procesie rozpoznawania stanu) podobnego wskaźnika odnoszącego się do zbioru zmiennych objaśniających model ekonometryczny:

$$h_j = \left| \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i,j=1}^m |r_{i,j}|} \right| \quad (3)$$

gdzie:

$r_j = r(W, y_j); j = 1, \dots, m$ – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi W (stan zespołu pojazdu),
 $r_{i,j} = r(y_i, y_j); i, j = 1, \dots, m; i \neq j$ – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi y_i i y_j .

W przypadku braku danych ze zbioru W proponuje się je zastąpić przebiegiem czasowym maszyny [2], przy założeniu, że wyznaczenie diagnozy jest realizowane w przedziale zużycia normalnego. Wówczas $r_j = r(t_i, y_j); j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, K$ (r_j – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi $t_i \in (t_1, t_b)$ (t_i – przebieg pojazdu) i y_j).

Wybór parametru y^* do zbioru parametrów diagnostycznych sprowadza się wówczas do maksymalizacji wskaźnika h_j .

Zaletą przedstawionych metod jest to, że pozwalają wybrać ze zbioru parametrów wyjściowych jednoelementowe, jak i wieloelementowe zbiory parametrów diagnostycznych. Zbiór jednoelementowy odnosi się do przypadku, gdy pojazd jest zdekomponowany na układy i zespoły oraz konieczny jest wybór jednego parametru diagnostycznego. Zbiór wieloelementowy otrzymuje się, gdy w przedstawionych procedurach stosuje się mniej ostre ograniczenie, polegające na zakwalifikowaniu do zbioru parametrów diagnostycznych tych parametrów, których wartości wskaźników są większe (mniejsze) od (przyjętych odpowiednio dla metody) małych (dużych) liczb dodatnich.

Optimalizacja procesu rozpoznawania

Formułując zadanie optymalizacyjne trudno jest określić jedną skalarną funkcję jakości F , bowiem rozwiązania dopuszczalne X (metody wyboru parametrów diagnostycznych i metody prognozowania) mogą mieć wiele różnych właściwości, których wartości świadczą o jakości rozwiązania. Stąd też zachodzi

konieczność sformułowania w tym przypadku zadania optymalizacyjnego z wieloma (np. N) wskaźnikami jakości w postaci funkcji kryterium F

$$F : X \rightarrow R^N \quad (4)$$

$$F = (F_1, F_2), \quad F_1 = \{f_{1,1}, f_{1,2}\}, \quad F_2 = \{f_{2,6}, f_{2,7}\} \quad (5)$$

gdzie:

- $f_{1,1}$ – kryterium zmienności parametru diagnostycznego,
- $f_{1,2}$ – kryterium skorelowania parametru diagnostycznego ze stanem technicznym maszyny,
- $f_{2,6}$ – kryterium rozbieżności przeciętnego względnego błędu prognozy, zespół miar Theila,
- $f_{2,7}$ – promień przedziału błędu prognozy.

Algorytm metodyki wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i optymalnej metody prognozowania zawiera następujące etapy [3]:

- wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych dla przedstawionych metod wyboru, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_1$;
- wyznaczenie prognozy według przedstawionych metod prognozowania, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_2$;
- wyznaczenia rozwiązań zadań optymalizacji.

Prognozowanie stanu technicznego maszyn na podstawie zmiany wartości parametrów diagnostycznych [1, 2], odnoszące się do dłuższego okresu wiąże się z ryzykiem, że prognoza oparta będzie na zdezaktualizowanym modelu, a więc takim, którego elementy (optymalny zbiór parametrów diagnostycznych i optymalna metoda prognozowania) nie odzwierciedlają już rzeczywistych związków między stanem technicznym zespołów maszyn a prognozą. Optymalna prognoza powinna więc być stabilna w całym okresie prognozowania stanu maszyny i stąd konieczność badania jej wrażliwości w zależności od czynników charakterystycznych dla eksploatacji maszyn. Między wymienionymi etapami istnieje ścisła więź, która polega na tym, że każdy poprzedni etap wpływa na następny. Dlatego chcąc poddać analizie wrażliwość prognozy należy odnieść ją zarówno do poszczególnych etapów, jak także uwzględnić ją w występujących między nimi zależnościach.

Zjawiska zużycia zespołów maszyn są bardzo złożone i na ich kształtowanie wpływa zwykle wiele czynników, zaś uwzględnienie wszystkich jest niemożliwe. Dlatego abstrahując od działania wszystkich czynników, określa się optymalny zbiór parametrów diagnostycznych ze względu na niektóre kryteria. Pozostałe traktuje się jako czynniki wpływające na stabilność tego zbioru. Uważa się, że najważniejszymi wśród nich są:

- minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do uruchomienia predykcji,
- zmienna niezawodność zespołów maszyn w czasie jego eksploatacji, wynikająca np. z wymiany lub regulacji zespołów oraz zmiennych warunków eksploatacji (np. warunki pracy, warunki klimatyczne, jakość obsługi, inne), powodująca skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych,
- maksymalna wartość kroku czasowego,
- liczebność optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.

Niezależnie od wyboru optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych, na podstawie którego wyznacza się prognozę, ważną rolę odgrywa także wybór metody prognozowania. Podobnie jak w poprzednim przypadku, optymalną metodę wybiera się na podstawie niektórych kryteriów. Pozostałe traktuje się jako czynniki na nią wpływające. Uważa się, że najważniejszymi wśród nich są:

- horyzont prognozy,
- minimalna liczba punktów czasowych niezbędna do uruchomienia predykcji;
- liczba punktów czasowych przed czasem t_b przyjmowana do obliczenia prognozy,
- zmienna niezawodność zespołów maszyn w czasie eksploatacji, powodująca skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych.

Przystępując więc do wyznaczania terminu obsługiwanego pojazdu natrafia się na problemy, które sprowadzają się do następujących pytań:

- czy optymalny zbiór parametrów diagnostycznych jest stabilny, czy wykazuje istotne zmiany, a jeśli tak, to jaki jest charakter tych zmian w zależności od przedstawionych czynników,
- w jaki sposób na stabilność optymalnej prognozy wpływają czynniki charakterystyczne dla eksploatacji maszyn: wartość horyzontu prognoz, zmienne warunki eksploatacji i zmienna niezawodność zespołów pojazdu.

Trafna odpowiedź na te pytania jest niezbędna do efektywnego prognozowania stanu pojazdu i wymusza konieczność badania wrażliwości optymalnej prognozy na powyższe czynniki. Jeżeli badanie wykazuje, że prognoza jest stabilna, wówczas można ją wykorzystać w strategii eksploatacji maszyn według stanu. W przeciwnym przypadku należy podjąć decyzję o modyfikacji założeń i ograniczeń procesu wyznaczania prognozy, np. poprzez nieuwzględnienie czynników wywołujących niestabilność rozwiązania i tym samym zmniejszających uniwersalność otrzymanego rozwiązania.

Procedury rozpoznawania stanu

W celu realizacji algorytmu rozpoznawania stanu użytkownik powinien dysponować zbiorem odpowiednich procedur:

- kontroli stanu pojazdu D_{KS} ;
- lokalizacji uszkodzeń układów i zespołów pojazdu D_{LU} ;
- prognozowania stanu technicznego pojazdu.

W przypadku procedur kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń pojazdu istnieje bogata literatura w postaci instrukcji obsługiwanego (wydawnictwa producenta) lub w postaci procesów technologicznych diagnozowania (wydawnictwa branżowe użytkownika).

Analizując metody prognozowania nie można ściśle wykazać wyższości pewnych metod nad innymi. Zależy to bowiem od tego, jaki obiekt jest przed-

miotem badań prognostycznych. Stosując jednak kryteria dotyczące wymagań związanych z:

- postacią prognozy;
- wpływem zmiany warunków eksploatacji pojazdu i czynności obsługowych na właściwości eksploatacyjne pojazdu, które należy uwzględnić przy wyborze metody prognozowania;
- wyborem metod prognozowania (metody ekstrapolacyjne trendu i metody adaptacyjne);

oraz wyniki badań [3] w celu wyznaczenia terminu kolejnego diagnozowania, proponuje się wykorzystać metody adaptacyjne Browna-Mayera rzędu 1 i rzędu 2 [1]. Na przykład metoda M-B rzędu 1 polega na tym, że wartość prognozowaną parametru $y_{p\tau}$ oblicza się, przy założeniu liniowości trendu zmiennej $Y(t)$, z zależności:

$$\begin{aligned} y_{p\tau} &= a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} \\ a_t^{(0)} &= M_t = 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)} \\ a_t^{(1)} &= T_t = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} [M_t^{(1)} - M_t^{(2)}] \\ M_t^{(1)} &= \alpha y_t + (1-\alpha) M_{t-1}^{(1)} \\ M_t^{(2)} &= \alpha M_t^{(1)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(2)} \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

α – parametr wykładniczego, $\alpha \in <0,1>$

Algorytm wyznaczenia terminu t_{b1} :

1. Na podstawie danych wartości parametrów diagnostycznych w czasie $[t_1, t_b]$ określić wartość prognozowaną $y_{p\tau}(t_b + \tau)$ (rys. 3).
2. Obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ :

$$r_\sigma \cong q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{k=1}^K e_{pk}^2} \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)^3} \left[1 + 4(1-\alpha) + 5(1-\alpha)^2 + 2(4-3\alpha)\tau^2 + 2\alpha^2\tau^2 \right]} \quad (7)$$

3. Obliczyć termin następnego obsługiwanego t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego y_{jg} z dolną [przy założeniu, że $y_j(t_b) > y_{jg}$] lub górną [przy założeniu, że $y_j(t_b) < y_{jg}$] granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień $r_{\sigma\tau}$

Dla $y_j(t_b) > y_{jg}$:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau(y_{jp}(t_b) - r_{j\sigma})}{y_{jp}(t_b) - y_{pt}} \quad (8)$$

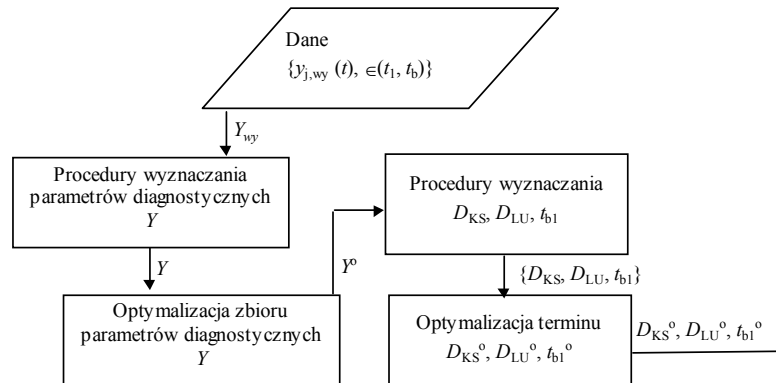
4. Przeprowadzić obsługiwane w terminie t_{b1} i określić różnicę $e_p(t_{b1})$

$$e_p(t_{b1}) = |y_j(t_{b1}) - y_{jp}(t_{b1})|, \quad e_p = \frac{1}{K+1} \sum_{i=1}^{K+1} e_{pi}(t_{bi}) \quad (9)$$

Algorytm metodyki rozpoznawania stanu technicznego maszyn

Algorytm metodyki rozpoznawania stanu zawiera następujące etapy [3]:

- wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych,
- wyznaczenie terminu kolejnego diagnozowania.



Rys. 1. Schemat wyznaczania optymalnych procedur rozpoznawania stanu technicznego pojazdów

Przykład wyznaczania optymalnego terminu diagnozowania t_{b1}

Przedmiotem obliczeń jest wyznaczenie optymalnej metody prognozowania i t_{b1}^o dla [3]:

a) silnika spalinowego (OB1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór parametrów $Y = \{y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}\}$;

b) układ tłokowo-korbowy silnika (U1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y = \{y_{12}, y_{14}\}$;

gdzie:

y_{11} – moc silnika; $y_{n11} = 221$ kW, $y_{g11} = 165$ kW,

y_{12} – średnie ciśnienie sprężania; $y_{n12} = 2,5$ MPa, $y_{g12} = 1,9$ MPa,

y_{13} – średnie ciśnienie wtrysku, $y_{n13} = 24,8$ MPa, $y_{g13} = 17,0$ MPa,

y_{14} – ciśnienie oleju silnikowego, $y_{n14} = 1,05$ MPa, $y_{g14} = 0,6$ MPa.

Na podstawie obliczeń określono, że dla OB1 optymalnym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y^o = \{y_{11}, y_{13}\}$ z odpowiednimi wartościami wag: $w_{11} = 0,35$, $w_{13} = 0,65$, zaś dla U1 optymalnym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y^o = \{y_{12}, y_{14}\}$ z odpowiednimi wartościami wag: $w_{12} = 0,9$, $w_{14} = 0$.

Przykładowe wyniki obliczeń dla OB1 i U1 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyznaczenie optymalnej metody prognozowania i terminu kolejnego diagnozowania t_{b1}

Obiekt	Y^o	w_j	$X(\alpha)$	t_b [km]	e_p [%]	r_σ [%]	t_{b1} [km]
OB1	y_{11}, y_{13}	0,35; 0,65	$x(0,65)$	8800	11	8,1	11491
U1	y_{12}, y_{14}	0,9; 0,1	$x_2(0,4)$	8800	8	8,2	12255

Optymalną metodą prognozowania dla OB1 jest metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 1 ze współczynnikiem $\alpha = 0,65$, termin kolejnego diagnozowania wynosi 11491 km, błąd prognozy $e_p = 11\%$ dla U1 – metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 1 ze współczynnikiem $\alpha = 0,4$, termin kolejnego diagnozowania wynosi 12255 km, błąd prognozy $e_p = 8\%$.

Podsumowanie

Przedstawione rozważania sformułowane w postaci zaleceń i algorytmów wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i metod wyznaczania prognozy stanu technicznego odnoszą się do przedstawionego w opracowaniu schematu rozpoznawania stanu pojazdów.

Ze względu na zaproponowany niezbyt liczny zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych i zbiór metod prognozowania) nie można sformułować konkluzji, że opracowana metodyka rozpoznawania stanu ma charakter ostateczny i może stanowić gotowy projekt systemu diagnostyczno-prognostycznego pojazdów. Jednak uzyskane wyniki weryfikacji procedur oraz możliwość jej stosowania we wszystkich fazach istnienia maszyn może stanowić podstawę do dalszych prac w obszarze aplikacji softwaru i hardware systemu diagnostyczno-prognostycznego pojazdów.

Piśmiennictwo

1. Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. Mechanika, z. 4. Zesz. Nauk. AGH, Kraków 1984.
2. Tylicki H., Żółtowski B.: Niezawodnościowe – diagnostyczne aspekty wyznaczania terminów kolejnego obsługiwanie. Materiały XXVII Zimowej Szkoły Niezawodności, 437-449, Szczyrk 1999.
3. Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wyd. ATR, 93-129, Bydgoszcz 1998.

Streszczenie

Opracowanie dotyczy procedur optymalizacji rozpoznawania stanu pojazdów. Na podstawie wyników badań zaproponowano metodykę optymalizacji wyboru parametrów diagnostycznych oraz wyboru metod prognozowania stanu do rozpoznawania stanu.

Summary

The paper concerns optimization procedures in vehicle state assessment. On the basis of test results methodology was proposed for an optimization of the choice of diagnostic parameters and for the choice of the prognostication methods to assess the state of vehicles.

Recenzent: Dr hab. inż. Zbigniew Burski