

## BADANIE EWOLUCJI STANU MASZYN

Henryk TYLICKI

Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno – Rolnicza

ul. S.Kaliskiego 7, 85-763 Bydgoszcz, e-mail: tylicki@atr.bydgoszcz.pl

W opracowaniu przedstawiono problematykę badania ewolucji stanu maszyn, w tym szczególnie prognozowania stanu technicznego maszyn w strategii eksploatacji według stanu. Rozpatrzono zagadnienie wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego maszyn oraz przedstawiono metodę wyznaczania terminu kolejnego diagnozowania.

### THE INVESTIGATION OF MACHINES STATE EVOLUTION

In work one represented problems of investigation of machines state evolution, in this especially prognosis of technical state machines in strategy of exploitation according to state. One examined problem of marking optimum - prognoses of technical state machines and one represented method of marking of following time -limit

Słowa kluczowe: strategia eksploatacji według stanu, prognozowanie stanu maszyn, optymalizacja procedur prognozowania.

#### 1. WPROWADZENIE

W każdej fazie istnienia maszyn, w celu podjęcia decyzji o sposobie postępowania z nimi, konieczne jest określenie ich stanów za pomocą metod i środków diagnostyki technicznej. Może to być decyzja o ich użytkowaniu, o podjęciu przedsięwzięć profilaktycznych (regulacja lub wymiana) lub wprowadzeniu zmian podczas konstruowania i wytwarzania maszyn. Możliwe jest to dzięki temu, że diagnostyka techniczna pozwala na udzielenie odpowiedzi na pytania: jaki jest aktualny stan badanej maszyny ?, jak ocenić przeszłość maszyny na podstawie jej aktualnego stanu ?, jak przewidzieć przyszłą ewolucję stanu maszyny ?.

Odpowiedź na każde z tych pytań wymaga przeanalizowania zbioru zadań pojawiających się podczas opracowywania algorytmów diagnozowania. W przypadku odpowiedzi na pytanie dotyczące ewolucji stanu maszyny należy podczas procesu prognozowania rozwiązać zadanie prognozowania stanu, polegające na przewidywaniu stanów maszyny, które zaistnieją w przyszłości w chwilach  $\Theta_p > \Theta_b$  ( $\Theta_b$  - chwila diagnozy,  $\Theta_p$  - jedna z chwil w przyszłości).

W odróżnieniu od klasycznego zadania diagnostycznego, którego celem jest identyfikacja aktualnego stanu, w zadaniu prognostycznym występuje sekwencja :

„historia wartości sygnału diagnostycznego → prognozowana wartość sygnału diagnostycznego → prognozowany stan maszyny”.

Głównymi problemami pojawiającymi się przy rozwiązaniu zadania prognozowania stanu technicznego maszyn będzie:

- sformułowanie celu prognozowania stanu technicznego maszyny i określenie postaci prognozy;
- zmiana stanu technicznego maszyny w czasie eksploatacji;
- opis stanu technicznego maszyny za pomocą cech stanu oraz zależność pomiędzy cechami stanu i sygnałami diagnostycznymi;
- rozwiązanie zadania prognozowania stanu.

#### 2. OPIS STANU TECHNICZNEGO MASZyny ZA POMOCĄ SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO

W procesie eksploatacji następuje pogorszenie właściwości użytkowych maszyn. Zwiększają się luzy w parach kinematycznych, osłabiają się mocowania elementów i zmieniają się nastawy regulacyjne. Następuje zatem zmiana własności zespołów pojazdów, co powoduje zmianę procesów wyjściowych realizowanych przez pracujące zespoły maszyn. Procesy wyjściowe dzieli się na :

- robocze, wynikające bezpośrednio z realizacji użytkowych funkcji urządzenia, np. przetwarzanie energii chemicznej w ciepło (pracę mechaniczną), przetwarzanie energii chemicznej w energię elektryczną, przetwarzanie energii elektrycznej w pracę mechaniczną, przetwarzanie energii kinetycznej w ciepło, przenoszenie i zwiększanie energii;
- towarzyszące, powstające jako wtórny efekt zasadniczych procesów roboczych, np. termiczne,

wibroakustyczne, elektryczne generowane przy tarcu, starzenie środków smarnych;

c) inne procesy fizyczno-chemiczne, wykorzystywane w badaniach nieniszczących, np. badania wizualne (endoskopowe i holograficzne), badania magnetyczne, badania radiograficzne, badania ultradźwiękowe.

Procesy wyjściowe można opisać wielkościami mierzalnymi, mierzonymi bez demontażu urządzenia, które nazywa się parametrami wyjściowymi  $S_{wy}$ .

Tezę tę potwierdza praktyka eksploatacyjna maszyn oraz prowadzone badania, na podstawie których podano przykładowo dla niektórych układów pojazdu cechy stanu (ilościowe i jakościowe) i odpowiadające im parametry wyjściowe.

Stany techniczne, w których może znaleźć się maszyna, tworzą zbiór  $W = \{w_k, k=1,2,\dots,K\}$ , zaś konkretny stan  $w_k$  maszyny jest wyznaczony przez  $N$  niezależnych cech stanu  $u_n$  jako wektor  $w_k = (u_n); n=1,2,\dots,N$ .

Liczba stanów maszyny  $w_k$  zależy od wymagań, jakie w praktyce eksploatacyjnej stawia się procesowi oceny stanu technicznego pojazdu. W najprostszym przypadku zbiór możliwych stanów  $W = \{w_k\}$  dzieli się na klasy:

- klasę stanów zdatności  $W^0$ ,
- klasę stanów niezdatności  $W^1$ .

Przy założeniu szeregowej struktury niezawodnościowej maszyny wyróżnia się dwa skrajne przypadki:

a) jeżeli w maszynie o  $p$  zespołach występuje pojedyncze uszkodzenie, wówczas jest jeden stan zdatności  $W^0$  i  $W_p^1 = p$  stanów niezdatności,

b) jeżeli dopuszcza się dowolną kombinację jednoczesnego uszkodzenia zespołów, to liczba stanów wynosi: jeden stan zdatności  $W^0$  i  $W_k^1$  stanów niezdatności.

Przy założeniu  $k$  - wartościowej oceny stanów, liczbę stanów niezdatności określa wyrażenie  $W_p^1 = k^p - 1$ , co powoduje znaczny wzrost liczby stanów i w konsekwencji komplikuje algorytmy oceny stanu technicznego maszyny. Dlatego też przy ustalaniu liczby stanów przedmiotu diagnozy dąży się do minimalizacji zbioru stanów stosując przy tym różne kryteria, np. prawdopodobieństwo występowania stanów, bezpieczeństwo użytkownika maszyny i struktury użytkowej.

Stan  $w_k$  będzie znany, jeśli będą znane wartości  $u_n$ . Zadanie to można rozwiązać zastępując cechy stanu  $\{u_n\}$ , w myśl przedstawionej powyżej tezy, odpowiednimi parametrami wyjściowymi  $\{s_{jwy}\}$ :

$$w_k = f_1(\{s_{jwy}\}); \quad j = 1, 2, \dots, I \quad (1)$$

Pośrednie określanie stanu technicznego  $w_k$  jest możliwe, ponieważ prawdziwa jest zależność:

$$u_n = f_2(\{s_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, I \quad (2)$$

Postać funkcji  $u_n = f_2(\{s_j\})$  ustala się podczas określania zależności pomiędzy cechami stanu i cechami sygnału diagnostycznego (parametrami diagnostycznymi), gdzie uzyskuje się układ  $N$  równań typu (3) będący odwzorowaniem przestrzeni stanów, opisanej współrzędnymi  $u_1, u_2, \dots, u_N$  w przestrzeni parametrów diagnostycznych  $s_1, s_2, \dots, s_J$ . Ze względu na to, że posługiwanie się układami równań może być skomplikowane oraz kłopotliwe jest wyznaczenie wartości cech stanu, stan techniczny  $w_k$  maszyny określany jest na podstawie wartości parametrów diagnostycznych  $\{s_j, j=1, \dots, J\}$  według zależności:

$$w_k = f_1(\{s_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

Zbiór możliwych do uwzględnienia parametrów diagnostycznych jest bardzo liczny, stąd występuje konieczność ich redukcji. Konsekwencją tego jest utrata informacji związanej z parametrami objętymi obserwacją i pojawienie się obszaru niewiedzy. Powoduje to, podobnie jak w przypadku cech stanu, element przypadkowości (składnik losowy). Istnienie tego składnika powoduje potraktowanie sygnałów diagnostycznych jako szczególnego rodzaju procesy losowe.

Przyjmując fakt, że zarówno cechy stanu maszyny, jak i sygnały diagnostyczne zmieniają się w sposób ciągły w czasie (w przypadku wymiany lub regulacji zespołów maszyn zmiana może być skokowa) występuje konieczność dyskretnej reprezentacji takiego sygnału. Najczęściej stosuje się sposób reprezentowania losowych sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu poprzez ciągi estymowanych wartości cech sygnału diagnostycznego. Czasowa historia zmienności cech sygnału (parametrów diagnostycznych) jest wówczas dana w postaci dyskretnych, uporządkowanych w czasie, ciągów wartości liczbowych. Ciągi tego typu są określone terminem „szeregu czasowego”. Podstawą ustalenia kolejności elementów w „szeregu czasowym”, w przypadku pojazdów mechanicznych, jest liczba przejechanych kilometrów przez pojazd od początku eksploatacji (przebieg pojazdu) lub liczba godzin działania (liczba motogodzin).

Istotnym wymaganiem dla szeregu czasowego jest żądanie stałej wielkości tzw. „kroku czasowego” w tym szeregu. Wymóg ten należy rozumieć w ten sposób, że wartość funkcji porządkującej (np. przebieg pojazdu) dla każdego elementu szeregu musi różnić się od wartości tej funkcji dla elementu sąsiedniego o stałą wartość (ze względu na bierne i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne, wymóg ten np. w przypadku pojazdów może być trudno osiągalny).

Wskutek oddziaływania procesów wymuszających zużycie następują zmiany wartości cech stanu objawiające się pogorszeniem stanu technicznego zespołów maszyn. Stopniowo kumulujące się zmiany doprowadzają do osiągnięcia wartości granicz-

nych cech stanu, a także wartości granicznych odpowiadających im cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych), podczas których następuje zmiana lub pełna utrata właściwości eksploatacyjnych, przy których dalsza eksploatacja maszyny jest niemożliwa lub nieopłacalna.

Przekroczenie wartości granicznej mierzonych parametrów diagnostycznych oznacza wejście maszyn w stan przyspieszonego zużycia. W przypadku diagnostyki bezpośredniej i w eksperymentach czynnych ustalenie wartości granicznych dla zorientowanych uszkodzeniowo parametrów diagnostycznych jest stosunkowo proste.

Problem komplikuje się w diagnostyce pośredniej, w której ustalenie stanu granicznego na podstawie parametru jest trudniejsze. Realizowane najczęściej w przypadku maszyn bierne i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne dostarczają wartości parametrów diagnostycznych, które podczas wnioskowania diagnostycznego są porównywane z wartościami granicznymi dostępnymi w normach krajowych, zagranicznych, branżowych lub z danymi własnych doświadczeń. W przypadku braku takich norm możliwe jest wyznaczanie wartości granicznych parametrów diagnostycznych poprzez statystyczny opis procesu eksploatacji, np. za pomocą metody Neymana-Pearsona.

### 3. PROGNOZOWANIE STANU TECHNICZNEGO MASZYN

Stan maszyny  $W(\Theta_n)$  w chwili czasu  $\Theta_n$  można scharakteryzować za pomocą zbioru wartości symptomów  $s_j(\Theta)$ ;  $e_j, \dots, m$ .

Maszyna w chwili  $\Theta_n$  znajduje się w stanie zdatności  $W^0$ , gdy spełniony jest warunek:

$$\forall (j=1, \dots, m) \quad \{s_{j,d} \leq s_j(\Theta_n) \leq s_{j,g}\} \quad (4)$$

gdzie:  $\{s_{j,d}\}$ ,  $\{s_{j,g}\}$  - zbiory dolnych i górnych wartości granicznych symptomów.

Analogicznie można sformułować warunek zdatności w chwili  $W^0(\Theta_{n+\tau})$ :

$$\forall (j=1, \dots, m) \quad \{s_{j,d} \leq s_j(\Theta_{n+\tau}) \leq s_{j,g}\} \quad (5)$$

przy czym elementy zbioru  $\{s_j(\Theta_{n+\tau})\}$  są nieznanymi i stąd konieczność ich przewidywania w założonym przedziale czasu  $\tau$ .

Wielkość  $\tau$  oznacza przedział czasu, dla którego realizowany jest proces prognozowania (wielkość  $\tau$  nazywa się także wyprzedzeniem lub „horyzontem czasowym prognozy”).

W ujęciu tym ocenę czasu przejścia urządzenia w stan niezdatności wyznaczają wyniki prognoz parametrów diagnostycznych  $\{s_j(\Theta_{n+\tau})\}$ , sygnalizujące przekroczenie wartości granicznych.

Postępowanie takie umożliwia wyznaczenie terminu diagnozowania maszyny w strategii obsługiwa-

nia według stanu technicznego. Realizowane to może być według następujących sposobu prognozowania stanu technicznego maszyny polegającego na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzujących proces pogarszania stanu w przyszłości.

Biorąc pod uwagę fakt, że występujące w czasie eksploatacji maszyny nieodwracalne procesy zużycia wymuszają monotoniczny trend wartości kontrolowanych parametrów diagnostycznych oraz, że zmiany wartości parametrów diagnostycznych pomiędzy poszczególnymi badaniami stanu mogą istotnie różnić się, przy czym zazwyczaj nie znane są ich funkcje gęstości prawdopodobieństwa, przyjmuje się że :

**„wyznaczenie terminu kolejnego diagnozowania maszyny jest możliwe w wyniku prognozowania stanu technicznego maszyny polegającego na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych w przyszłości i przyrównaniu ich wartości chwilowych do wartości granicznych”.**

Metoda ta zgodnie z przyjętym sposobem prognozowania polega na tym, że :

- Zjawisko pogarszania się stanu technicznego maszyny jest reprezentowane szeregiem czasowym  $s_t = \langle s_1, s_2, \dots, s_b \rangle$ , (zbiór dyskretnych obserwacji  $\{s_t = \zeta(\Theta)\}$ ;  $\Theta = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_b$ ) niestacjonarnego procesu stochastycznego  $\zeta(\Theta)$ ).
- Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości  $\zeta(\Theta)$  w czasie opisuje funkcja trendu  $\mu(\Theta)$  zakłócona różnymi oddziaływaniami losowymi  $\eta(\Theta)$

$$s_t = \mu(\Theta) + \eta(\Theta) \quad (6)$$

gdzie:  $\mu(\Theta)$ - opisuje tendencję rozwojową parametru diagnostycznego  $s(\Theta)$ ,

$\eta(\Theta)$ -wyraża działanie czynników przypadkowych (warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsługi).

Konstruuje się takie oszacowanie  $\{\mu_p(\Theta)\}$ ;  $\Theta = 1, 2, \dots, b$  dla nieznannej postaci trendu  $\mu(\Theta)$ , która zapewniałaby odpowiednią dokładność prognozy  $s_p(\Theta)$ , przy ekstrapolacji  $\mu_p(\Theta)$  na odcinek czasu (przebiegu maszyny)  $(\Theta_b, \Theta_p)$ ,  $\Theta_p = \Theta_b + \tau$ .

Oszacowanie  $\mu_p(\Theta)$  wyznacza wówczas wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w chwili  $\Theta_p = \Theta_b + \tau$ , a tym samym prognozy stanu technicznego maszyny  $W(\Theta_b + \tau)$ .

Wówczas :

1. Wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji układu lub zespołu pojazdu wyznacza horyzont prognozy  $\tau_j^0$ , dla którego brak jest przekroczenia wartości granicznej parametru diagnostycznego  $\{s_{jg}\}$  przez granicę przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień granicy przedziału  $r_\sigma$  :

$$r_{\sigma} = q\sigma_p \quad (7)$$

gdzie:  $q$  - parametr z tablicy rozkładu Studenta do wymaganego poziomu ufności  $\gamma$  i  $K-2$  liczby stopni swobody,

$\sigma_p$  - odchylenie standardowe składnika losowego błędu prognozy  $e_p$

2. W przypadku systemu obsługiwanego według stanu technicznego wymaganą postacią prognozy maszyny PSTM jest termin kolejnego diagnozowania i obsługiwanego  $\Theta_{b1}$ .

Ponadto przyjęto, aby wielkościami dodatkowymi PSTM były: wartość błędu prognozy  $e_p$ :

$$\text{PSTM} = \langle \Theta_{b1}, e_p \rangle \quad (8)$$

3. Jako wartość  $\Theta_{b1}$  przyjmuje się wówczas wartość dopuszczalnego czasu eksploatacji maszyny określony wartością horyzontu  $\{\tau_j^0\}$ , wyznaczoną jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego  $s_{jg}$  (rys.2):

- z dolną (przy założeniu, że  $s(\Theta_b) > s_{jg}$ ),

- lub górną (przy założeniu, że  $s(\Theta_b) < s_{jg}$ )

granicy przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień  $r_{\sigma}^{0.05}$  dla poziomu ufności  $1-\gamma = 0.95$ , co interpretuje się, że w przedziale wyznaczonym przez horyzont  $\tau_j^*$  prawdopodobieństwo, że parametr diagnostyczny  $s_j$  osiągnie wartość graniczną  $s_{jg}$  wynosi  $p=0.05$ .

Ponadto rozpatruje się przecięcie linii wartości granicznej parametru diagnostycznego  $s_{jg}$  z granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez  $r_{\sigma}^{0.01}$  dla poziomu ufności  $1-\gamma = 0.99$ , co interpretuje się, że w przedziale wyznaczonym przez horyzont  $\tau_j^*$  prawdopodobieństwo, że parametr diagnostyczny  $s_j$  osiągnie wartość graniczną  $s_{jg}$  wynosi  $p=0.01$ .

Wyróżnić można wówczas trzy opcje:

1. Nie przekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień  $r_{\sigma}^{0.01}$  interpretuje się wówczas jako brak sygnału alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu.

2. Przekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień  $r_{\sigma}^{0.01}$  interpretuje się jako sygnał alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu (próg alertowy).

3. Moment przekroczenia przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień  $r_{\sigma}^{0.05}$  interpretuje się jako czas  $\Theta_{b1}$  - termin obsługiwanego układu lub zespołu pojazdu (próg alarmowy).

W takiej sytuacji przedział czasu  $(\Theta_1, \Theta_b)$  będzie okresem estymacji wartości oczekiwanej błędu prognozy  $e_p$  i promienia granicy przedziału błędu prognozy  $r_{\sigma}$ , zaś okres czasu po  $\Theta_b$  będzie okresem aktywnej prognozy, tzn. wyznaczenia:

- wartości prognozowanej parametru diagnostycznego po czasie horyzontu prognozy  $\tau$ ,  $s_{jp}(\Theta_b+\tau)$ ;
- określenie wartości promienia granicy przedziału błędu prognozy  $r_{\sigma}(\Theta_b+\tau)$ ;
- wyznaczenie terminu następnego diagnozowania i obsługiwanego maszyny  $\Theta_{b1}$ .

#### 4. OPTIMALIZACJA PROCESU PROGNOZOWANIA

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  $F: X \rightarrow R^N$ .

Funkcja ta przyporządkowuje każdemu rozwiązaniu dopuszczalnemu  $x \in X$  jego liczbową ocenę w postaci wektora:

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_n(x), \dots, F_N(x)) \in R^N \quad (9)$$

gdzie:  $N = \{1, \dots, n, \dots, N\}$  - zbiór numerów wskaźników jakości

$F_n(x)$  - wartość  $n$  - tego wskaźnika jakości ( $n$  - tej funkcji kryterium dla rozwiązania  $x \in X$ ).

W przypadku optymalizacji wielokryterialnej procesu prognozowania zbiór rozwiązań dopuszczalnych  $X$  stanowią zbiory:

$$X = \{X_1, X_2\} \quad (10)$$

gdzie:  $X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}\}$  - zbiór metod wyznaczania parametrów diagnostycznych,

$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m}\}$  - zbiór metod prognozowania.

W przypadku dysponowania zbiorami  $F_1$  i  $F_2$ , można określić wektorowy wskaźnik jakości rozwiązania prognozy  $F$  jako:

$$F = (F_1, F_2) \quad (11)$$

i wyznaczyć funkcje kryterialne  $F_1$  i  $F_2$ , np. jako:

$$F_1 = \{f_{1,1}, f_{1,2}\}, \quad F_2 = \{f_{2,6}, f_{2,7}\} \quad (12)$$

gdzie:  $f_{1,1}$  - kryterium zmienności parametru diagnostycznego,

$f_{1,2}$  - kryterium skorelowania parametru diagnostycznego ze stanem technicznym pojazdu,

$f_{2,6}$  - kryterium rozbieżności przeciętnego, względnego błędu prognozy - zespół miar Theila,

$f_{2,7}$  - promień przedziału błędu prognozy.

Wówczas zadanie optymalizacyjne procesu prognozowania przedstawia się jako parę zadań polioptymalizacji:

$$(X_1, F_1, \Phi_1), (X_2, F_2, \Phi_2) \quad (13)$$

gdzie:  $X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4}\}$  - zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych;

$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}\}$  - zbiór metod prognozowania;

$F_1$  - funkcja kryterialna wyboru parametrów diagnostycznych:  $F_1: X_1 \Rightarrow R^2$ ,  $F_1(X_1) = (f_{1,1}(X_1), f_{1,2}(X_1))$  o preferencji:  $F_1(X_1): (\max, \max)$ ;

$F_2$  - funkcja kryterialna wyboru metod prognozowania:  $F_2: X_2 \Rightarrow R^2$ ,  $F_2(X_2) = (f_{2,6}(X_2), f_{2,8}(X_2))$  o preferencji:  $F_2(X_2): (\min, \min)$ ;

$\Phi_1$  - relacja dominowania zadania optymalizacyjnego określenia zbioru parametrów diagnostycznych;

$\Phi_2$  - relacja dominowania zadania optymalizacyjnego wyboru metod prognozowania.

Rozwiązanie zadań polioptymalizacji realizuje się według następującego algorytmu (np. dla wyznaczenia optymalnej metody prognozowania):

1. Normalizacja przestrzeni kryterialnej - przestrzeń  $D^*$ :

Zbiór wyników unormowanych  $D^*$

$$D^* = \{d^{*i}\}, i=1, \dots, n; d^{*i} = (d_1^{*i}, d_2^{*i}) \quad (14)$$

2. Określenie współrzędnych punktu idealnego -  $d^{**}$

$$d^{**} = (d_1^{**}, d_2^{**})$$

$$d_1^{**} = \min_{x \in X_2} f_{2,6}(x), d_2^{**} = \min_{x \in X_2} f_{2,7}(x) \quad (15)$$

3. Obliczenie wartości normy  $|\bullet|_z$  parametrem  $p=2$  -  $r_i(D^*)$

Norma  $|\bullet|_z$  jest miarą odległości wyników  $d^* \in D^*$  od punktu idealnego  $d^{**}$ :

$$r_i(D^*) = |d^{**} - d^{*i}| \quad (16)$$

4. Określenie wyniku optymalnego  $x^0$  w zadaniu optymalizacji metod prognozowania -  $x_2^0$ :

$$x_2^0 = d^0 = \min r_i \quad (17)$$

## 5. WERYFIKACJA METODYKI NA PRZYKŁADZIE ZESPOŁÓW POJAZDU MECHANICZNEGO

Dla zweryfikowania opracowanej metody wyznaczania PSTM<sup>o</sup> wykorzystano wyniki badań samochodów STAR 200 oraz wyniki badań hamownianych silników UTD-20.

W przypadku samochodów STAR 200 badania prowadzone były w IEPM WAT [4] na próbie

losowo wybranych 8 samochodów ciężarowych skrzyniowych. Zakres badań obejmował pomiary wartości parametrów diagnostycznych układów pojazdu (silnika S-359 i układu napędowego). Badania były realizowane z częstotliwością nakazaną przez producenta w instrukcji samochodu. Średni przebieg badanego samochodu wynosił 237757 km. Wykorzystując wyniki badań określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu samochodu, w tym także wartości nominalne  $\{y_n\}$  i wartości graniczne  $\{y_g\}$ ):

a) dla silnika S-359 samochodu STAR 200:

$y_5$  - średnie ciśnienie sprężania;  $y_{n5} = 2,9$  MPa,  $y_{g5} = 2,3$  MPa,

$y_6$  - średni ubytek powietrza przed ZZP;  $y_{n6} = 3\%$ ,  $y_{g6} = 23\%$ ,

$y_7$  - średni ubytek powietrza w ZZP;  $y_{n7} = 3\%$ ,  $y_{g7} = 23\%$ ;

b) dla układu napędowego samochodu STAR 200:

$y_8$  - luz obwodowy skrzyni biegów;  $y_{n8} = 1,5^\circ$ ,  $y_{g8} = 4^\circ$ ,

$y_9$  - luz obwodowy przekładni głównej;  $y_{n9} = 6,5^\circ$ ,  $y_{g9} = 18^\circ$ ,

$y_{10}$  - całkowity luz obwodowy układu napędowego;  $y_{n10} = 8^\circ$ ,  $y_{g10} = 22^\circ$ .

Dla silnika S-359 i układu napędowego STAR 200 szereg czasowy zawiera 12 elementów ( $0 \div 240000$  km) z „krokiem czasowym”  $\Delta t = 24000$  km.

W celu zilustrowania opracowanych algorytmów wyznaczania PSTM<sup>o</sup> wykorzystano także wyniki badań hamownianych silników UTD-20 prowadzone w WOSS Piła [4]. Zakres badań obejmował pomiar wartości parametrów diagnostycznych silników przekazanych do remontu średniego i silników zużytych awaryjnie.

Wykorzystując wyniki badań określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu pojazdu, w tym także wartości nominalne  $\{y_n\}$  i wartości graniczne  $\{y_g\}$ ):

a) dla silnika UTD-20:

$y_{11}$  - 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.

Analizowany szereg czasowy dla silnika UTD-20 zawiera 40 elementów (od 855 km do 8858 km). Przyjęto, że „krok czasowy” w analizowanym szeregu czasowym odpowiada odległości w czasie dwóch kolejnych pomiarów, przy czym w związku z nierównością tych odległości wprowadzono tzw. średni „krok czasowy”  $\Delta t_i$  obliczony według zależności:

$$\Delta t_i = \frac{t_b - t_1}{K - 1} \quad (18)$$

gdzie:

$t_b$  - przebieg, przy którym badany jest silnik,

$t_1$  - przebieg początku eksploatacji silnika,

$K$  - ilość elementów szeregu czasowego.

Wyznaczanie PSTM<sup>o</sup> zrealizowano dla dwóch poziomów dekompozycji pojazdu STAR 200: UKŁAD - ZESPÓŁ.

#### 1. UKŁAD:

a) przestrzeń nadłokowa silnika S-359 (U2), analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_5, y_6, y_7\}$ ;

b) układ napędowy samochodu STAR 200 (U3), analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_8, y_9, y_{10}\}$ .

#### 2. ZESPÓŁ - zespoły układu napędowego:

a) skrzynia biegów (Z4); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_8\}$ ;

b) przekładnia główna (Z5); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_9\}$ .

Wyznaczanie PSTM<sup>o</sup> dla silnika UTD-20 zrealizowano dla trzech poziomów dekompozycji: OBIEKT - UKŁAD - ZESPÓŁ.

#### 1. OBIEKT:

a) silnik spalinowy UTD-20 (OB1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór parametrów  $Y=\{y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}\}$ ;

#### 2. UKŁAD:

a) układ tłokowo - korbowy silnika UTD-20 (U1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_{12}, y_{14}\}$ ;

#### 3. ZESPÓŁ: zespoły układu tłokowo - korbowego silnika UTD-20:

a) węzeł tłok - pierścienie - cylinder (T-P-C) silnika (Z2); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_{12}\}$ ;

b) para czop - panewka silnika (Z3); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór  $Y=\{y_{14}\}$ .

W celu wyznaczenia współrzędnych punktów idealnych  $c^{**}$  i  $d^{**}$  rozwiązano zadania optymalizacyjne. Wykorzystując w tym celu przeprowadzoną w punkcie algorytmizację procedur wyznaczania optymalnej prognozy, opracowano programy komputerowe w środowisku WINDOWS / EXCEL:

- # PD (Parametry Diagnostyczne),

- # MP (Metody Prognozowania),

- # WOM (Wybór Optymalnych Metod),

będące implementacją opracowanych algorytmów.

Programy te umożliwiły :

1. Program # PD - wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych według różnych metod. Wyniki działania programu dla elementów szeregów czasowych (przebieg  $t_1 \div t_b$ ), dla poziomu UKŁAD samochodu STAR 200 oraz silnika UTD-20 zawarte są w tabelicy 1.

Zestawienie to zawiera także wyniki użycia programu # PD do rozwiązania zadania optymalizacyj-

nego, tzn. wyznaczenia  $y^*$  dla metod  $X_1$ , przy czym ze względu na brak danych (macierz  $[M(i,j)]_{k \times m}$ ) dla rozwiązania  $x_{1,1}$  wybrano parametr  $y^*$  na podstawie przeprowadzonej ankiety wśród diagnostów pojazdów mechanicznych).

Tablica 1. Zestawienie wyników wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych

#### a) OB1 - Silnik UTD-20

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | $r_i$ | $W_j$ | $W_j^*$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| $y_{11}$          | $y^*$     | $y^*$     |           | $y^*$     | 0,74  | 0,35  | 0,35    |
| $y_{12}$          |           |           |           |           |       |       |         |
| $y_{13}$          |           |           | $y^*$     |           | 0,26  | 0,65  | 0,65    |
| $y_{14}$          |           |           |           |           |       |       |         |

#### b) U1 - Układ tłokowo-korbowy silnika UTD-20

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | $r_i$ | $w_j$ | $W_j^*$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| $y_{12}$          | $y^*$     | $y^*$     |           | $y^*$     | 0,37  | 0,89  | 0,9     |
| $y_{14}$          |           |           | $y^*$     |           | 0,07  | 0,10  | 0,1     |

#### c) U2 - Przestrzeń nadłokowa silnika S-359

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | $r_i$ | $W_j$ | $W_j^*$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| $y_5$             | $y^*$     |           |           |           | 0,87  | 0     | 0,1     |
| $y_6$             |           | $y^*$     |           | $y^*$     | 0,09  | 0     | 0,4     |
| $y_7$             |           |           | $y^*$     |           | 0     | 1     | 0,5     |

#### d) U3 - Układ napędowy samochodu STAR 200

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | $r_i$ | $W_j$ | $w_j^*$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| $y_8$             |           |           |           |           |       |       |         |
| $y_9$             |           |           | $Y^*$     |           | 0     | 1     | 0,6     |
| $y_{10}$          | $y^*$     | $Y^*$     |           | $y^*$     | 0,11  | 0     | 0,4     |

2. Program # MP - wyznaczenie zbioru prognoz ( $t_{b1}$  - prognozowany termin obsługi,  $e_p$  - błąd prognozy,  $r_\sigma$  - promień przedziału granicy błędów prognozy), według różnych metod ze zbioru  $X_2$  wraz z wartościami kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej  $F_2$ .

Wyniki działania programu dla elementów szeregów czasowych przy przyjęciu wartości „horyzontu czasowego prognozy”  $\tau$  równej wartości „kroku czasowego”  $\Delta t$ , dla dwóch poziomów dekompozycji samochodu STAR 200 i silnika UTD-20, oraz dla dwóch wartości współczynnika  $1-\gamma = (0,99; 0,95)$  i odpowiadających im dwóch wartości promienia przedziału błędów prognozy ( $r_{\sigma 1}$  i  $r_{\sigma 2}$ ) i dwóch wartości terminu obsługi ( $t_{b1,1}$  - próg alertowy;  $t_{b1,2}$  - próg alarmowy) zawarto w tabelicy 2.

W celu wyznaczenia, dla rozwiązań  $x_{2,3}$  i  $x_{2,4}$ , optymalnych wartości współczynnika  $\alpha$  przeprowadzono badania [1] (wykorzystując przedstawioną w pracy metodę rozwiązania zadania optymalizacyjnego z funkcją kryterialną  $F_2$ ). Optymalne wartości współczynnika  $\alpha$  dla rozwiązań  $x_{2,3}$  i  $x_{2,4}$ , w przypadku gdy  $x_2^0 = x_{2,3}$  lub  $x_2^0 = x_{2,4}$ , przedstawiono w tabelicy 2.

3. Program # WOM - wyznaczenie rozwiązań zadań polioptymalizacji metodą rozwiązań kompromisowych  $C_K^{\Phi 1}$  i  $D_K^{\Phi 2}$  według algorytmu (rys.3.6). W przypadku optymalizacji zbioru parametrów

diagnostycznych obliczono także wartości funkcji wagi  $w_j$ , przy czym możliwe jest korygowanie wartości  $w_j$  przez użytkownika w postaci wartości skorygowanej  $w_j^*$ . Wartości wyników obliczeń dla rozwiązania  $C_K^{\Phi_1}$  (wyznaczenie  $x_1^0$  i  $\{w_j\}$ ) zawarto w tablicy 1, zaś wartości wyników obliczeń dla rozwiązania  $D_K^{\Phi_2}$  (wyznaczenie  $x_2^0$ ) przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Zestawienie wyników wyznaczania PSTM<sup>o</sup>

a) Samochód STAR 200

| Obiekt | $Y^o$           | $W_j$               | $X_2^0(\alpha)$ | $e_p$ [%] | $r_{\sigma 2}$ [%] | $t_{b1,2}$ [km] |
|--------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------------|
| U2     | $y_5, y_6, y_7$ | 0,1;<br>0,4;<br>0,5 | $X_{2,3}(0,6)$  | 8,8       | 2,4                | 198660          |
| U3     | $y_9, y_{10}$   | 0,6;<br>0,4         | $X_{2,3}(0,8)$  | 11        | 1,8                | 234720          |
| Z4     | $y_8$           | 1                   | $X_{2,1}$       | 2,4       | 1,7                | 362023          |
| Z5     | $y_9$           | 1                   | $X_{2,1}$       | 4,0       | 1,6                | 196144          |

b) Silnik UTD-20

| Obiekt | $Y^o$            | $W_j$         | $x_2^0(\alpha)$ | $e_p$ [%] | $r_{\sigma 2}$ [%] | $t_{b1,2}$ [km] |
|--------|------------------|---------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------------|
| OB1    | $y_{11}, y_{13}$ | 0,35;<br>0,65 | $x_{2,3}(0,6)$  | 11        | 8,1                | 11491           |
| U1     | $y_{12}, y_{14}$ | 0,9;<br>0,1   | $x_{2,1}$       | 18        | 8,2                | 12255           |
| Z1     | $y_{13}$         | 1             | $x_{2,3}(0,6)$  | 10,9      | 4,7                | 13651           |
| Z2     | $y_{12}$         | 1             | $x_{2,3}(0,4)$  | 15,2      | 9,2                | 13047           |
| Z3     | $y_{14}$         | 1             | $x_{2,3}(0,3)$  | 13,3      | 7,4                | 18540           |

Na podstawie analizy wyników przedstawionych w tablicy 1 i 2 stwierdzono, że:

- W przypadku OB1, U1, U2, U3, U4, U5 otrzymuje się optymalny wieloelementowy zbiór parametrów diagnostycznych;
- Optymalnymi metodami prognozowania dla analizowanych obiektów jest rozwiązanie  $x_{2,1}$  oraz rozwiązanie  $x_{2,3}$  (z różnymi wartościami współczynnika wyrównywania wykładniczego  $\alpha$ ).
- Rozwiązania  $x_{2,3}$  z  $\alpha < 0,5$  świadczą o nieregularnej zmianie trendu w czasie i konieczności przywiązania większej wagi do ocen trendu w okresach poprzedzających termin badania pojazdu ( $t_b$ ). Rozwiązania z  $\alpha \in (0,5; 0,95)$  świadczą o regularnej zmianie trendu w czasie i konieczności przywiązania większej wagi do najnowszej oceny trendu w okresach poprzedzających termin badania pojazdu ( $t_b$ ).
- Wartości błędów prognozy dla analizowanych obiektów zawierają się w przedziale od 5 do 18%.
- W przypadku obiektów grupy silnika UTD-20 i samochodu STAR 200 wartości błędów prognozy są większe. Wynika to z :  
- dość dużych wahań wartości parametrów diagnostycznych  $y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}$  wynikających z przeprowadzonych wymian i regulacji zespo-

łów silnika w w okresie czasu ( $t_1, t_b$ ) oraz zmiennej wartości „kroku czasowego”  $\Delta t$ ;

- większej wartości „horyzontu czasowego prognozy” ( $\tau = 24000$  km) oraz z małej liczby elementów szeregu czasowego użytych do obliczeń w przypadku układów i zespołów samochodu STAR 200.

- Wartości składników prognozy PSTM =  $\langle t_{b1}, e_p, r_{\sigma} \rangle$  zależne są od poziomu dekompozycji pojazdu (wartości  $e_p, r_{\sigma}$  są większe dla wieloelementowych zbiorów parametrów diagnostycznych);
- W przypadku, gdy  $x_2^0 = x_{2,3}$  wartości  $e_p, r_{\sigma}$  są o kilkadziesiąt procent większe dla kilku pierwszych elementów szeregu czasowego (szczególnie dla silnika UTD-20). Z tego względu przy minimalnej liczbie elementów szeregu czasowego niezbędnej do obliczeń, obok spełnienia postulatu (3.49), powinno się uwzględnić też postulat maksymalnego błędu prognozy (3.54).
- W zależności od wartości poziomu ufności  $1 - \gamma$  otrzymuje się różne wartości promienia  $r_{\sigma}$  i odpowiadające im terminy ( $t_{b1,1}$  - próg alertowy,  $t_{b1,2}$  - próg alarmowy). Znaczne różnice wartości tych wielkości (dochodzące do kilkunastu tysięcy km) mogą pozwolić użytkownikowi na przyjęcie odpowiadających mu opcji alternatywnych, np. w stosunku do zalecenia obsługiwanego przy progu alarmowym, obsługiwanego układu lub zespołu pojazdu przy progu alertowym.

PODSUMOWANIE

W podsumowaniu opracowania zawierającego problematykę prognozowania stanu maszyn jako części ogólnej teorii procesu diagnozowania stanu maszyn, należy zwrócić uwagę na czynniki warunkujące jej rozwój. Będą to warunki istnienia:

- zainteresowania służb logistycznych parku maszynowego prognozowaniem stanu maszyn;
- odpowiedniej bazy metodycznej dla podejmowania takich zadań;
- odpowiednich środków technicznych zabezpieczających ich realizację;
- odpowiedniej przygotowanej kadry specjalistów mogących w sposób właściwy podejmować takie zadania.

Należy także zwrócić uwagę, że prognozowanie stanu maszyn wiąże się z przetwarzaniem dużej ilości danych pomiarowych, jak również złożonymi operacjami numerycznymi związanymi z aproksymacją, modelowaniem, czy też predykcją szeregów czasowych. Nieodzowne jest więc komputerowe wspomaganie procesu prognozowania w oparciu o odpowiednie oprogramowanie, umożliwiające interaktywny dostęp do procedur bibliotecznych za pośrednictwem języka poleceń zbliżonego do konwencjonalnej notacji matematycznej.

Proste algorytmy prognozowania stanowią coraz częściej element standardowego oprogramowania zintegrowanych przyrządów, przeznaczonych do analizy sygnałów diagnostycznych w badaniach maszyn. Najczęściej jednak wytwórcy aparatury badawczej nie publikują szczegółów dotyczących formalnych podstaw działania tych urządzeń, np. w zakresie narzuconych ograniczeń, posiadanych mechanizmów zabezpieczających poprawne ich funkcjonowanie lub informacji uzasadniających brak konieczności kontrolowania określonej grupy założeń, na których ich rozwiązania funkcjonują. Tendencje rozwoju problematyki prognozowania stanu maszyn, jakie występują jednak obecnie w badaniach diagnostycznych, można ocenić pozytywnie. Wynika to z coraz bogatszego software`u prognostycznego różnych firm na rynku, zajmującego się tą problematyką, szerokiego zaplecza badawczego różnych ośrodków naukowo - badawczych i pozytywnych doniesień literaturowych dokumentujących nowe rozwiązania prognostyczne dla różnych klas maszyn (np. maszyny górnicze

i hutnicze, systemy przeróbki ropy naftowej, turbogeneratory, pojazdy i maszyny robocze).

#### LITERATURA

- [1] Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. Mechanika, z. 4. Zeszyty Naukowe AGH, Kraków 1988.
- [2] Kaźmierczak J.: Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn. Mechanika, z. 95. Zeszyt Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1989.
- [3] Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
- [4] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki technicznej. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1997.



Dr hab. inż. Henryk Tylicki – prof. nadzw. ATR jest kierownikiem Pracowni Diagnostyki Maszyn w Katedrze Maszyn Roboczych i Pojazdów Akademii Techniczno – Rolniczej w Bydgoszczy. Jest autorem wielu opracowań i publikacji z zakresu diagnostyki technicznej i eksploatacji maszyn. Jest członkiem PDTD, Zespołu Diagnostyki SPE KBM PAN oraz Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, Oddział w Lublinie. Współpracuje z wieloma ośrodkami naukowymi w kraju i zagranicą. Główne prace opublikowane: *Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych* (1998), *Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych (współautor)* (1999), *Osprzęt elektryczny pojazdów mechanicznych (współautor)* (2000). Jest organizatorem wielu seminariów i cyklicznych konferencji: „Forum Młodych” i „Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów”.