

METODOLOGIA BADANIA WRAŻLIWOŚCI PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO MASZYN

Henryk TYLICKI, Jacek RÓŻYCKI
Akademia Techniczno – Rolnicza, Bydgoszcz

Streszczenie:

W pracy rozpatrzono problem wrażliwości prognozy w zależności od czynników eksploatacyjnych maszyn. Przedstawiono koncepcję programu symulacyjnego do badania wrażliwości prognozy stanu maszyn. Przeprowadzone wstępne badania pozwalają na sformułowanie wniosków odnośnie potrzeby i możliwości badania wrażliwości prognozy stanu maszyn w aspekcie wykorzystania metodyki wyznaczania prognozy w dynamicznym systemie eksploatacji maszyn.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, prognozowanie stanu maszyn, wrażliwość prognozy, metodologia badania wrażliwości prognozy stanu maszyn.

Wstęp

Prognozowanie stanu technicznego maszyn, na podstawie zmiany wartości parametrów diagnostycznych [1], odnoszące się do dłuższego okresu wiąże się z ryzykiem, że prognoza oparta będzie na modelu zdezaktualizowanym, 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.

Schemat wyznaczania prognozy składa się z [2] :

- a) wyboru optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych;
- b) wyboru optymalnej metody prognozowania;
- c) oceny jakości prognozy.

Pomiędzy wymienionymi etapami istnieje ścisła więź, która przejawia się w tym, że każdy poprzedni etap wpływa na następny, także chcąc poddać analizie wrażliwość prognozy należy odnieść ją zarówno do poszczególnych etapów jak i 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 ich wszystkich jest niemożliwe. Dlatego świadomie abstrahując od

działania wszystkich czynników określa się optymalny zbiór parametrów diagnostycznych ze względu na niektóre kryteria, pozostałe traktując jako czynniki wpływające na stabilność tego zbioru. Uważa się, że najważniejszymi wśród nich są :

- a) minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do uruchomienia predykcji;
- b) 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;
- c) maksymalna wartość kroku czasowego;
- d) liczność optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.

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

- a) horyzont prognozy;
- b) minimalna liczba punktów czasowych niezbędna do uruchomienia predykcji;
- c) liczba punktów czasowych przed czasem t_0 przyjmowana do obliczenia prognozy;
- d) zmienna niezawodność zespołów maszyn w czasie eksploatacji powodująca skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych.

Reasumując, przystępując do wyznaczania prognozy w postaci terminu diagnozowania zespołów maszyn natrafia się na problemy, które sprowadzają się do następujących pytań:

„Czy optymalny zbiór parametrów diagnostycznych jest stabilny, czy też 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, mianowicie: wartość horyzontu prognozy (o którym może decydować użytkownik maszyny), zmienne warunki eksploatacji i zmienna niezawodność zespołów maszyny ?”.

Trafne rozwiązanie tych problemów jest niezbędne do efektywnego prognozowania stanu maszyn, a tym samym wymusza konieczność badania wrażliwości optymalnej prognozy na powyższe czynniki. Jeżeli badanie wykazuje, że uzyskana prognoza jest stabilna wówczas można ją wykorzystać w dynamicznym systemie eksploatacji maszyny. W przeciwnym wypadku należy podjąć decyzję o modyfikacji założeń i ograniczeń procesu wyznaczania prognozy, np. poprzez świadome nieuwzględnienie czynników wywołujących niestabilność rozwiązania i tym samym zmniejszenie uniwersalności otrzymanego rozwiązania.

1. Metody badania wrażliwości prognozy maszyn

Przedstawiona konieczność badania stabilności prognozy wymaga metod, które pozwolą określić jej wrażliwość na przedstawione czynniki. W tym celu, po przeprowadzeniu modyfikacji niektórych metod badania stabilności modeli ekonometrycznych [3,4], opracowano następujące metody badania wrażliwości optymalnej prognozy. Są to :

1.1. Metoda badania wpływu zmiennej niezawodności zespołów maszyn

Zmienność niezawodności zespołów maszyn, wynikająca np. z ich regulacji lub wymiany jest pierwszym czynnikiem, który należy uwzględnić:

Przy wyborze optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych

Podstawą wnioskowania odnośnie wrażliwości optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych jest określenie stałości tego rozwiązania w funkcji przebiegu (dla kolejnych elementów szeregu czasowego). Stałość rozwiązań świadczy o braku wrażliwości zaś zmienność rozwiązań w funkcji przebiegu wymusza konieczność uwzględnienia wpływu zmiennej niezawodności zespołów maszyn na optymalny zbiór parametrów diagnostycznych w każdym n-tym elemencie szeregu czasowego. Proponuje się wówczas obliczyć wartości współczynnika korelacji liniowej i przyjmuje to rozwiązanie dla którego spełniona jest nierówność :

$$r_{j,n} \geq r_j^{\min} \quad (1)$$

gdzie: r_j^{\min} - przyjęta przez użytkownika minimalna wartość r_j , np. $r_j^{\min} = 0.9$.

Przy wyborze optymalnej metody prognozowania
Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości optymalnej metody prognozowania jest określenie zmienności tego rozwiązania w funkcji przebiegu

(czasu pracy) maszyny. Stałość rozwiązań świadczy o braku wrażliwości, zaś niestałość rozwiązań w funkcji przebiegu wymusza konieczność uwzględnienia wpływu zmiennej niezawodności zespołów maszyny na optymalną prognozę w każdym elemencie szeregu czasowego poprzez wyznaczenie prognozy według kryterium minimalnego błędu prognozy. Występowanie tego samego rozwiązania przed i po czynnościach regulacyjnych lub naprawczych oraz w zmiennych warunkach eksploatacji preferuje do stosowania to rozwiązanie.

1.2. Metoda badania wpływu wartości horyzontu prognozy

Horyzont prognozy τ jest wielkością, która wpływa istotnie na prognozę [4]. Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości optymalnej prognozy jest określenie stałości wartości błędu prognozy e_p dla różnych wartości horyzontu prognozy τ .

Stałość wartości e_p świadczy o braku wrażliwości, zaś niestałość wymusza konieczność określenia wartości horyzontu prognozy τ poprzez przyjęcie maksymalnej wartości dopuszczalnej błędu prognozy e_p według zależności:

$$\tau^* = \tau_{n^*} \quad n^* = 1, \dots, N \quad \wedge \quad e_p(\tau_{n^*}) < e_p^{\max} \quad (2)$$

Ponadto za pracą [3] wprowadza się ograniczenie odnośnie wartości τ w postaci :

$$\tau \leq 3\Delta t \quad (3)$$

gdzie: Δt - wartość kroku czasowego.

1.3. Metoda badania wpływu liczby elementów szeregu czasowego na prognozę

Rozpatruje się dwa problemy :

Określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego

Minimalna liczba elementów niezbędna do uruchomienia predykcji jest następnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy wyznaczaniu optymalnej prognozy. Jako podstawę wnioskowania proponuje się przyjąć :

- minimalną wartość elementów szeregu czasowego, niezbędną dla obliczenia prognozy według określonej metody prognozowania, n_p ;
- maksymalną wartość horyzontu prognozy, $\tau = 3\Delta t$.

Minimalną liczbę punktów czasowych n_{\min} oblicza się wówczas z wyrażenia :

$$n_{\min} \geq n_p + 3 \quad (4)$$

Dodatkowo należy sprawdzić ostatni n-ty element minimalnej liczby elementów szeregu czasowego poprzez określenie czy spełniona jest nierówność (1). W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór elementów kontynuuje się do chwili otrzymania pozytywnego wyniku sprawdzenia.

Określenie liczby punktów czasowych przed czasem t_b

Jako podstawę do wnioskowania o liczbie elementów przed czasem t_b przyjmowaną do obliczeń wyznaczania prognozy proponuje się przyjąć minimalną liczbę elementów n_{\min} (3) według zależności:

$$n_{\min}(t_b) \geq n_p \quad (5)$$

Dodatkowo sprawdza się ostatni n-ty element niezbędnej liczby elementów $n_{\min}(t_b)$ poprzez określenie czy spełniona jest nierówność :

$$e_p(n_{\min}(t_b)) < e_p^{\max} \quad (6)$$

gdzie: e_p^{\max} - maksymalna dopuszczalna wartość błędu prognozy akceptowana przez użytkownika, np. $e_p^{\max} < 10\%$

W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór elementów szeregu czasowego kontynuuje się do chwili otrzymania pozytywnego wyniku sprawdzenia.

1.4. Metoda badania wpływu liczności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych na prognozę

W wyniku optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych otrzymuje się optymalny zbiór parametrów diagnostycznych. W zależności od wyniku rozwiązania może być to zbiór jednoelementowy lub zbiór wieloelementowy. Dla potrzeb obliczenia prognozy proponuje się obliczenie wag ważności parametrów diagnostycznych w_j według zależności:

$$w_j = 1 - \frac{r_{ji}}{\sum_{j=1}^J r_{ji}} \quad (7)$$

gdzie: r_{ji} - odległość od punktu idealnego [2]

W przypadku zbioru jednoelementowego wartość $w_j=1$, w przypadku zbioru wieloelementowego wartość $w_j \in (0,1)$.

W celu obliczenia optymalnej prognozy DP^o proponuje się skorzystać z zależności:

$$DP^o = \frac{\sum_{j=1}^J DP_j^o}{\sum_{j=1}^J w_j}, \quad DP_j^o = \langle t_{jbi}^o \rangle \quad (8)$$

Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości optymalnej prognozy jest określenie stałości wartości błędu prognozy $e_p(6)$ dla różnej liczebności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^o . Stałość wartości e_p świadczy o braku wrażliwości, niestałość zaś wymusza konieczność zdeklarowania poziomu akceptacji zbioru Y^o poprzez przyjęcie maksymalnej dopuszczalnej wartości błędu prognozy e_p według zależności:

$$e_p(Y^o) < e_p^{\max} \quad (9)$$

W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór parametrów diagnostycznych realizuje według innych kryteriów np. według indywidualnych preferencji użytkownika.

2. Program symulacyjny do badania wrażliwości prognozowania stanu maszyn.

W celu zautomatyzowania pracy opracowano projekt programu symulacyjnego do badania wrażliwości prognozowania stanu maszyn.

Założenia funkcjonalne

Wrażliwość prognozy jest badana w zależności od:

- wyboru horyzontu prognozy,
- liczby pomiarów sygnałów diagnostycznych przed terminem badania przyjmowanym do obliczenia prognozy,
- minimalnej liczby punktów czasowych niezbędnych do uruchomienia predykcji,
- zmiennej niezawodności analizowanych maszyn spowodowanych np. naprawą,
- częstotliwości pomiarów sygnałów diagnostycznych (wielkości kroku czasowego),
- wyboru określonych sygnałów diagnostycznych.

Program umożliwia wprowadzanie następujących informacji:

- struktury analizowanych maszyn wraz z opisem dotyczącym poszczególnych podzespołów,
- wartości sygnałów diagnostycznych
- określenie parametrów badania takich jak:
 - wartości graniczne sygnałów,
 - horyzont prognozy,
 - przedział ufności,
 - numer badania,

- liczby pomiarów sygnałów diagnostycznych przed terminem badania przyjmowanym do obliczenia prognozy.

Program umożliwia generowanie zestawień (w tym zestawień tabelarycznych i wykresów) określających wartości:

- błędów prognozy,
- promienia przedziału granicy tolerancji prognozy,
- wartości terminu prognozowania.

Moduły programu

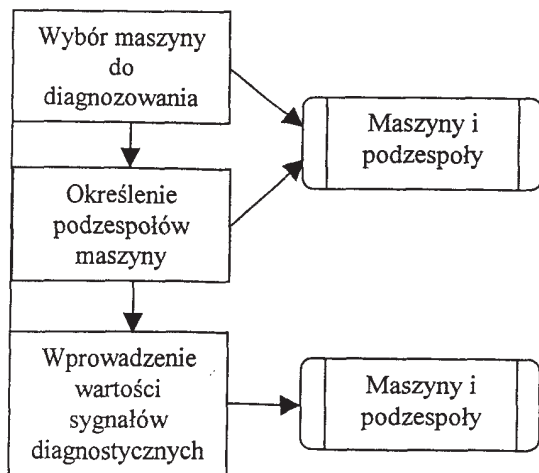
Program podzielony jest na następujące moduły:

- wprowadzania danych zewnętrznych,
- przeprowadzania badań (symulacji),
- procedur obliczeniowych,
- raportów.

Diagram przepływu danych.

Moduł wprowadzania danych zewnętrznych

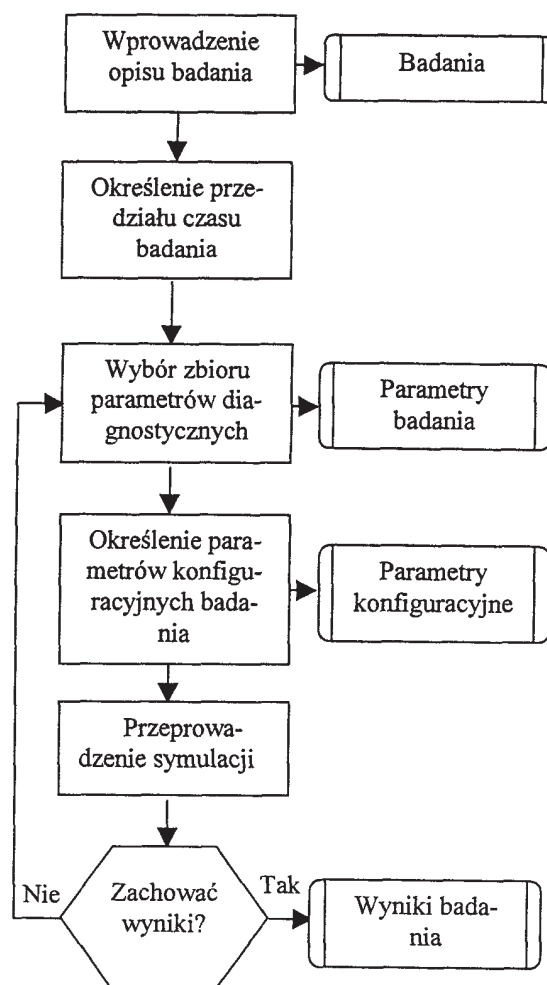
Umożliwia wprowadzanie danych o wybranych maszynach i podzespołach maszyn. Dane przechowywane są w formacie drzewa, którego wierzchołkami są maszyny, z jednym poziomem zagłębienia, w których przechowywane są dane dotyczące podzespołów. Dla każdego wierzchołka liścia mogą być wprowadzane wartości parametrów diagnostycznych o określonej nazwie.



Rys.1. Przepływ danych w module wprowadzania danych zewnętrznych.

Moduł przeprowadzania badań

Umożliwia przeprowadzanie badań symulacyjnych. Dla wybranych sygnałów diagnostycznych określa się parametry konfiguracyjne – po przeprowadzeniu symulacji wyniki badania mogą zostać zachowane.



Rys.2. Przepływ danych w module przeprowadzania badań.

3. Badanie wrażliwości prognozy na przykładzie zespołów pojazdu

Celem badań było określenie zależności prognozy od wartości horyzontu prognozy τ . Przedmiotem badań były zespoły i układy samochodów STAR 29 i STAR 200 oraz układy i zespoły silnika UTD-20 [2]. Zakres badań obejmował pomiary wartości parametrów diagnostycznych zespołów i układów samochodu oraz silnika. Charakteryzowały się one różnym przebiegiem w czasie rozpoczęcia badań, co umożliwiło zebranie wyników w zakresie przebiegu 1000 - 216000 km.

W celu określenia zależności optymalnej prognozy DP^o od wartości τ przyjęto do badań następujące wartości horyzontu prognozy:

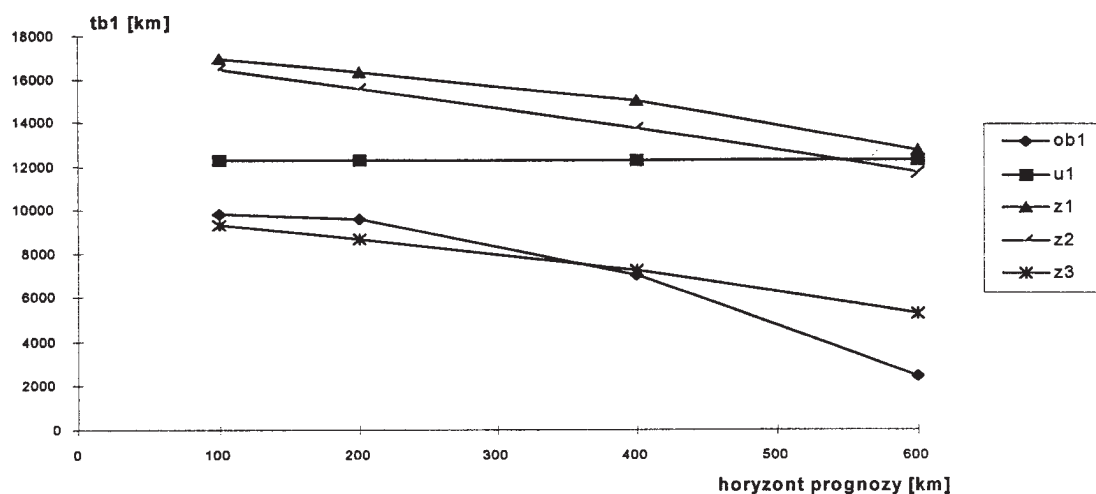
a) dla silnika UTD-20(ob1), jego układów (u1) i zespołów (z1, z2, z3): $dt_1 = 100$ km, $dt_2 = 200$ km, $dt_3 = 400$ km, $dt_4 = 600$ km;

Przyjęte wartości stanowią odpowiednio 50%, 100%, 150% i 300% wartości średniego kroku cza-

sowego w rozpatrywanych szeregach czasowych (t_1 , t_b).

Ponadto przyjęto współczynnik ufności $1 - \gamma = 0.95$ i odpowiednio: wartość promienia przedziału granicy błędu prognozy $r_{\sigma\tau}$ i termin diagnozowania t_{b1} (próg

alarmowy) [1]. Interpretację graficzną zmiany wartości elementów DP^o w zależności od różnych wartości horyzontu prognozy dla silnika UTD-20 przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Zmiana wartości terminu kolejnego diagnozowania t_{b1} w zależności od horyzontu prognozy τ

Analizując wyniki obliczeń oraz odpowiadające im interpretacje graficzne zmiany DP^o w zależności od horyzontu prognozy τ (rys.1) stwierdzono, że :

1. Zwiększenie wartości horyzontu prognozy τ powoduje wzrost wartości promienia przedziału granicy tolerancji prognozy $r_{\sigma\tau}$ i zmianę wartości terminu t_{b1} oraz nieznaczny wzrost błędu prognozy e_p .
2. Zmiana wartości horyzontu prognozy τ w przypadku metody parametru uogólnionego (u1) nie powoduje zmiany prognozy, z wyjątkiem nieznacznej zmiany błędu prognozy e_p .
3. Największe zmiany DP^o występują dla grupy zespołów silnika UTD-20. Spowodowane może być to nierówną wartością kroku czasowego analizowanego szeregu czasowego, pozostałe obiekty badań (z równymi krokami czasowymi - obiekty grupy samochodów STAR) wykazują zmiany kilkuprocentowe.
4. Zwiększenie wartości horyzontu prognozy τ zwiększa wartość błędu prognozy e_p oraz wartość promienia przedziału granicy tolerancji prognozy $r_{\sigma\tau}$ co wymusza konieczność odwołania się do warunku (2) i przyjęcie przez użytkownika akceptowanej przez niego wartości horyzontu prognozy τ^o .

Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań wrażliwości optymalnej prognozy na przykładzie zespołów pojazdu stwierdzono:

1. Zmiana wartości horyzontu prognozy τ powoduje, w przypadku wszystkich metod prognozowania z wyjątkiem metody parametru uogólnionego, zmianę wartości składników optymalnej prognozy DP^o . Wzrost wartości τ powoduje:

- a) wzrost wartości błędu prognozy e_p ;
- b) wzrost wartości promienia przedziału granicy tolerancji prognozy r_{σ} ;
- c) zmniejszenie wartości terminu następnego diagnozowania obsługiwanego t_{b1} .

Powoduje to konieczność, w przypadku przyjęcia $\tau > \Delta t_k$ sprawdzenia czy $t_{b1} > t_b$. W przypadku gdy nierówność ta nie jest spełniona należy zmniejszyć wartość τ . Na podstawie analizy wyników, stwierdza się, że maksymalną wartością horyzontu prognozy τ_{max} w myśl (2) jest $\tau_{max} = 3 \Delta t_k$.

2. Konieczne jest przeprowadzenie badań symulacyjnych wrażliwości prognozy na pozostałe czynniki sformułowane w punkcie 1 niniejszego opracowania z ewentualnym rozszerzeniem badań na inne grupy maszyn.
3. Przedstawiona metodyka badania wrażliwości prognozy oraz wnioski z przeprowadzonych badań

(wpływ horyzontu prognozy na optymalną prognozę) pozwala sformułować tezę odnośnie potrzeby i możliwości badania wrażliwości prognozy stanu maszyn w aspekcie jej wykorzystania w dynamicznym systemie eksploatacji maszyn.

Literatura

1. Tylicki H.: Conception of the optimization of devices technical condition forecasting process. *Machine Dynamics Problems*, 9 (1994), Warszawa 1995.
2. Tylicki H.: Synteza optymalnej diagnozy prognostycznej zespołów pojazdu mechanicznego. *Materiały seminarium IPM WAT, Warszawa: WAT 1996*, s. 62-78.
3. Waszkiewicz L.: Weryfikacja procedur prognostycznych. PWE, Warszawa 1975.
4. Zeliaś A.: Teoria prognozy. PWE, Warszawa 1984.
5. Tylicki H., Różycki J.: Badania wrażliwości prognozy stanu technicznego maszyn. *Materiały konferencji Forum Młodych' 2000, Bydgoszcz - Borówno 2000*, s. 223-230.