

Franciszek TOMASZEWSKI

ANALIZA PROGNOZY SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO SILNIKA SPALINOWEGO POJAZDU SZYNOWEGO

Streszczenie. W referacie przeprowadzono analizę trendu prognozy sygnału diagnostycznego (drganiowego) silnika spalinowego 2112SSF. Wybrano model najlepiej opisujący trend sygnału diagnostycznego. Wybrany model wykładniczy poddano szczegółowej analizie, polegającej na badaniu zmian współczynników modelu oraz współczynnika determinacji R^2 w zależności od horyzontu prognozy. Horyzont zadawanej prognozy związany był z osiągnięciem przez sygnał oszacowanej wartości granicznej i dopuszczalnej sygnału.

ANALYSIS OF A DIAGNOSTIC SIGNAL PROGNOSIS FOR A RAIL VEHICLE ENGINE

Summary. This paper presents an analysis of diagnostic (vibrational) signal prognosis trend for a case of the 2112SSF diesel engine. Model that describes the diagnostic signal trend best had been selected. The selected exponential model has been analyzed in details, the changes in model coefficients and coefficient of determination R^2 vs. range of prognosis, in particular. The range of applied prognosis relates to an estimate boundary value and a permitted value of signal.

1. WSTĘP

Każde zjawisko fizyczne zachodzące w obiektach mechanicznych przedstawiane dynamicznie, tzn. za pomocą szeregu czasowego, jest wypadkową działania przyczyn głównych (związanych z realizacją funkcji roboczych) oraz przypadkowych (zakłóceń, zmiennych warunków pracy itp.). Dla długich okresów działanie przyczyn głównych ujawniania się w tendencjach rozwojowych (trendu) badanego zjawiska. Statystyczną formą opisu tendencji rozwojowej są funkcje trendu. Funkcja trendu opisuje prawidłowości właściwe przeszłości, a zatem ukształtowane pod wpływem trwałych przyczyn (np. procesu zużywania, starzenia itp.), które działały w objętych badaniem okresach. Znając prawidłowości przebiegu procesu w przeszłości, można dokonać prognozy (predykcji) tego procesu w przyszłość. W diagnostyce badane zjawiska (starzenie, zużywanie, uszkodzanie itp.) obserwowane są w sposób pośredni za pomocą symptomów diagnostycznych [3].

Dotychczasowe badania w zakresie prognozowania wykazały, że klasyczne modele tendencji rozwojowej odgrywają w praktyce znaczną rolę. Stanowią one zwykle dobrą podstawę prognozy średniookresowej, wykazują trwale i wolne od istotnych zakłóceń losowych trendy. Klasyczne modele tendencji rozwojowych umożliwiają również budowę prognozy na krótkie okresy (prognozy krótkookresowe). Zastosowanie klasycznych modeli trendu pozwala ominąć problem określania zmiennych objaśniających w modelu, gdyż jedyną zmienną objaśniającą jest zmienna czasowa Θ . Technika sporządzania prognozy polega na ekstrapolacji funkcji trendu [3].

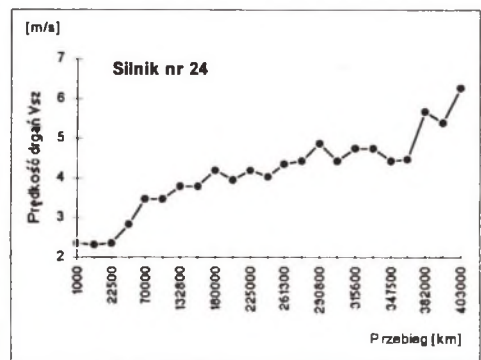
W prognozowaniu przyszłych zmian symptomu diagnostycznego istotne jest wyznaczenie wartości granicznej lub dopuszczalnej symptomu. Znajomość tych wartości pozwala na realizację dwu podstawowych celów prognozy związanych z odpowiedziami na pytania:

- czy dla zadanego horyzontu prognozy prognozowana wartość symptomu diagnostycznego osiągnęła wartość dopuszczalną lub graniczną?
- jaka jest wartość horyzontu prognozy, w którym prognozowana wartość symptomu diagnostycznego osiągnie wartość dopuszczalną lub graniczną?

W referacie przedstawiono analizę trendu prognozy sygnału drganiowego silnika spalinowego 2112SSF opartą na klasycznych modelach tendencji rozwojowych.

2. ZMIANY SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Przedmiotem analizy prognostycznej są parametry sygnału drganiowego, zarejestrowane w biernym eksperymencie diagnostycznym obserwowanej grupy silników spalinowych pojazdów szynowych 2112SSF lokomotyw serii SP45 [1]. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono przykładowe uzyskane z badań zmiany skutecznej wartości przyspieszeń drgań Ask oraz szczytowej wartości prędkości V_{sz} w funkcji przebiegu pojazdu.



Rys. 1. Przebieg skutecznej wartości przyspieszeń drgań na wysokości ZZ tłoka

Rys. 2. Przebieg szczytowej wartości prędkości drgań na wysokości ZZ tłoka

Fig. 1. Course of vibration acceleration effective values against the range of piston top dead center

Fig. 2. Course of vibration speed peak values against the range of piston top dead center

Przedstawione przykładowe przebiegi zmian wartości parametrów sygnału drganiowego zmierzonych na wysokości ZZ tłoków mają charakter zmian kumulacyjnych. Zakładając przyczynowość, a nawet determinizm we wzajemnej relacji stan \rightarrow sygnał lub zaawansowanie zużycia (uszkodzenia) \rightarrow symptom, można stwierdzić, że przebiegi te odwzorowują proces

eksploatacyjnego zużywania się silnika. Tendencja występująca w zmianach przedstawionych symptomów odwzorowuje działanie przyczyn głównych związanych ze starzeniem silnika, które ujawniają się w tendencji rozwojowej badanego zjawiska. W związku z powyższymi założeniami, można dla przedstawionych tendencji zmian symptomu wyznaczyć modele je opisujące. Mając wyznaczony model, można realizować prognozowanie dla zadanych horyzontów czasowych prognozy.

3. WYZNACZANIE FUNKCJI TRENDU

Do wyznaczania funkcji trendu uzyskanych z badań przebiegów parametrów sygnału drganiowego oraz szacowania współczynników modeli zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Analizie trendu poddano następujące modele:

– model liniowy

$$y(\Theta) = a \cdot \Theta + b \quad (1)$$

– model logarytmiczny

$$y(\Theta) = a \cdot \ln(\Theta) + b \quad (2)$$

– model wielomianowy 3 stopnia

$$y(\Theta) = a \cdot \Theta^3 + b \cdot \Theta^2 + c \cdot \Theta + d \quad (3)$$

– model potęgowy

$$y(\Theta) = a \cdot \Theta^b \quad (4)$$

– model wykładniczy

$$y(\Theta) = a \cdot e^{b\Theta} \quad (5)$$

Do określenia natężenia związku między rzeczywistymi sygnałami diagnostycznymi y a wartościami estymowanymi \hat{y} z prognozy zastosowano współczynnik determinacji $R^2 = R^2(y, \hat{y})$ wyrażający się wzorem:

$$R^2(y, \hat{y}) = \frac{\left[\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})(\hat{y}_k - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Współczynnik determinacji, jako unormowana miara siły liniowego związku sygnału diagnostycznego z wyznaczonymi z prognozy, jest podstawą doboru funkcji. Oczywiście, należy wybrać funkcje o współczynniku determinacji jak najbliższych jedności. Mała wartość współczynnika determinacji świadczy o słabym związku wybranego modelu z rzeczywistością.

W tabelicy 1 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń metodą najmniejszych kwadratów, dla dwu symptomów: skutecznej wartości przyspieszeń drgań i szczytowej wartości prędkości drgań w jednym punkcie pomiarowym na kadłubie silnika. W tabelicy tej podano również wartości wyznaczonych współczynników determinacji R^2 , które były podstawą doboru funkcji trendu danego symptomu [2].

Tablica 1

Przykładowe wyniki doboru funkcji trendu w punkcie pomiarowym znajdującym się na wysokości ZZ tloka, dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań oraz szczytowej wartości prędkości drgań

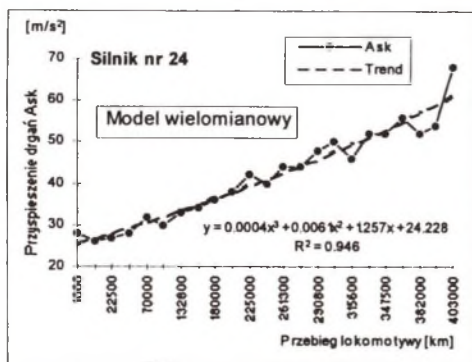
Punkt pomiaru	Model trendu	Równanie	Współczynnik determinacji
D1 Ask	liniowy	$y=1.413\Theta+22.522$	$R^2=0.91$
	logarytmiczny	$y=11.06\text{Ln}(\Theta)+14.663$	$R^2=0.83$
	wielomianowy 3 stopnia	$y=-0.0036\Theta^3+0.0957\Theta^2+0.9466\Theta+21.99$	$R^2=0.93$
	potęgowy	$y=19.121\Theta^{0.30K}$	$R^2=0.87$
	wykładniczy	$y=24.167e^{0.0381\Theta}$	$R^2=0.90$
D1 Vsz	liniowy	$y=0.1396\Theta+2.444$	$R^2=0.87$
	logarytmiczny	$y=1.123\text{Ln}(\Theta)+1.5999$	$R^2=0.84$
	wielomianowy 3 stopnia	$y=0.001\Theta^3-0.0372\Theta^2+0.5345\Theta+1.4716$	$R^2=0.93$
	potęgowy	$y=2.003\Theta^{0.307}$	$R^2=0.89$
	wykładniczy	$y=2.5825e^{0.0362\Theta}$	$R^2=0.84$

Obliczenia doboru funkcji trendu przeprowadzono dla dwóch symptomów: skutecznej wartości przyspieszeń drgań i szczytowej wartości prędkości drgań, trzech obserwowanych silników oraz 9 punktów pomiarowych na każdym silniku. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że najlepsze odwzorowanie (największe wartości współczynników determinacji R^2) uzyskano kolejno dla:

- modelu wykładniczego,
- modelu wielomianowego,
- modelu liniowego,

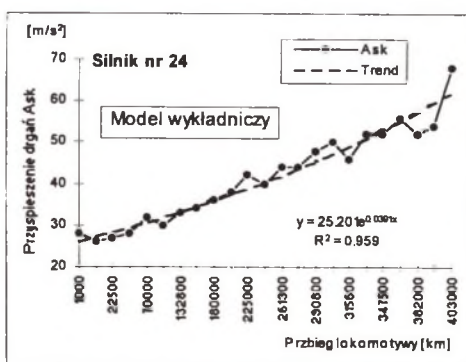
natomiast modele: logarytmiczny i potęgowy najgorzej opisują trend symptomu (najmniejsze wartości R^2).

Na rysunku 3 i 4 przedstawiono przebieg skutecznej wartości przyspieszeń drgań Ask z wyznaczonym trendem tego symptomu oraz modele, które najlepiej go opisują. W przypadku tego symptomu, najlepszymi modelami są model wielomianowy, dla którego $R^2=0.95$ oraz model wykładniczy, dla którego $R^2=0.96$.



Rys.3. Przebieg skutecznej wartości przyspieszeń drgań, jej trend oraz funkcja opisująca trend wraz z wartością R^2

Fig.3 Course of vibration acceleration effective value, its trend and trend describing function with the R^2 value

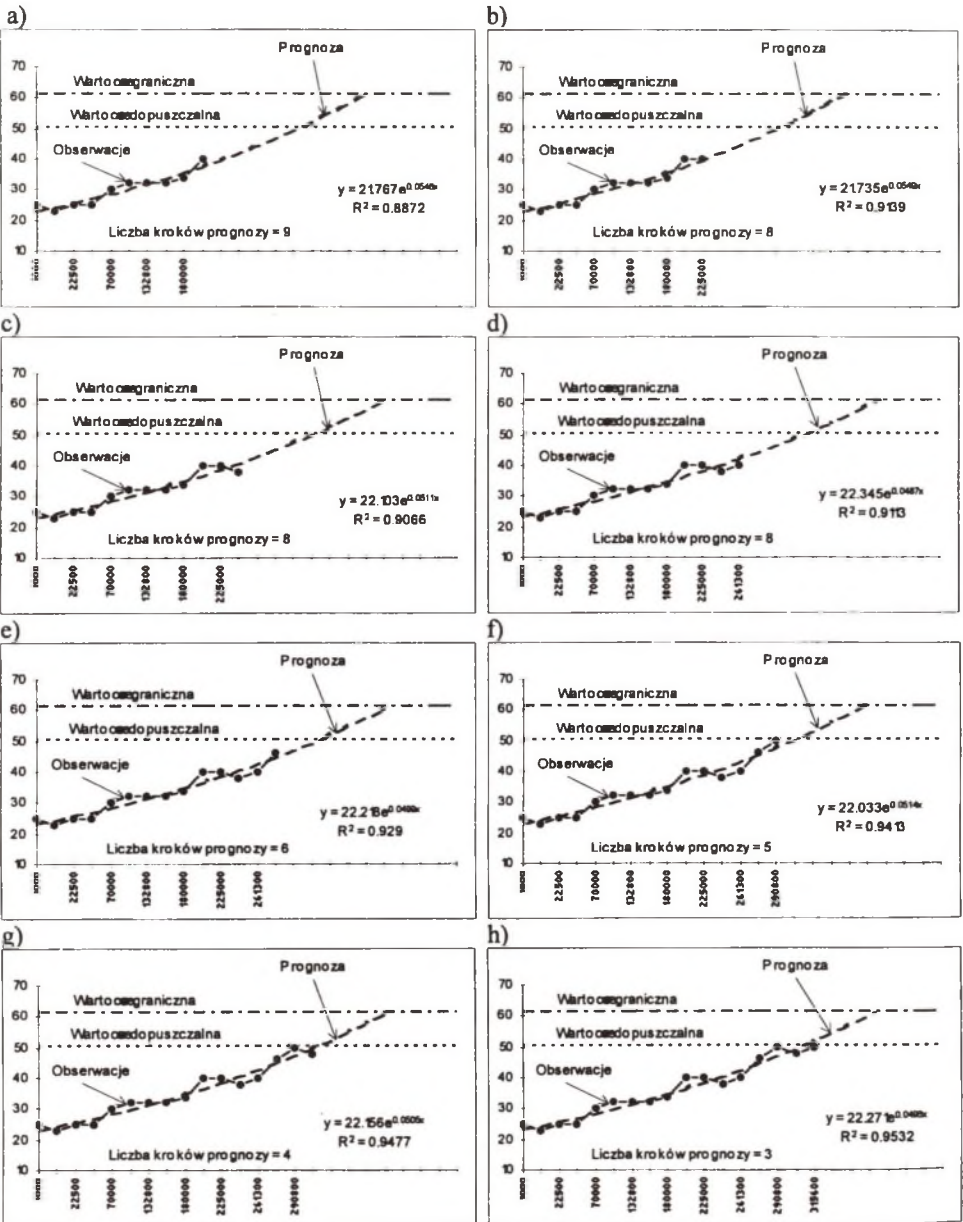


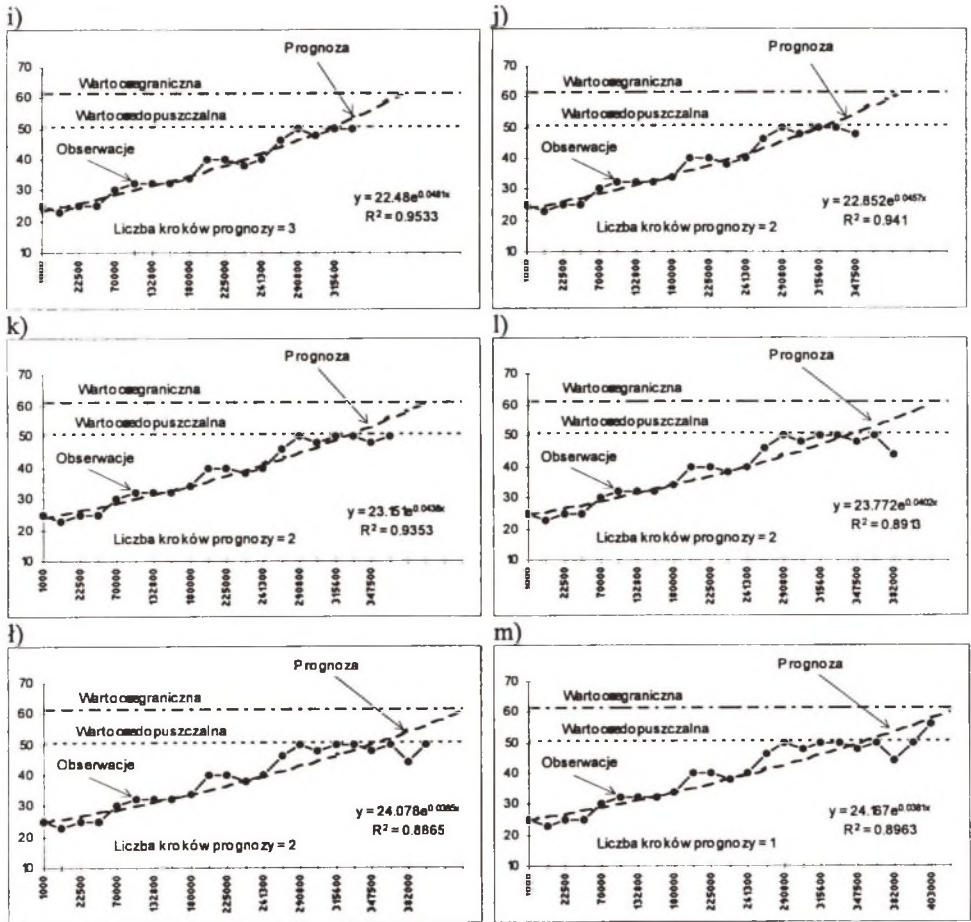
Rys.4. Przebieg skutecznej wartości przyspieszeń drgań, jej trend oraz funkcja opisująca trend wraz z wartością R^2

Fig.4 Course of vibration acceleration effective value, its trend and trend describing function with the R^2 value

4. ANALIZA MODELU PROGNOZY

Mając wybrane modele prognozy, przeprowadzono ocenę prognozowania dla wybranych modeli, której celem było zbadanie, jak zmieniają się współczynniki modelu w zależności od horyzontu prognozy, przy znanej wartości granicznej i dopuszczalnej symptomu. Na rysunku 5a-5m przedstawiono kolejne prognozy do osiągnięcia przez symptom wartości granicznej.





Rys. 5. Prognozowanie symptomu skutecznej wartości przyspieszeń A_{sk} w kolejnych krokach pomiarowych począwszy od 11 pomiaru do osiągnięcia przez wyznaczoną prognozę symptomu wartości granicznej
 Fig.5. Prognostication of the symptom of acceleration effective value A_{sk} at consecutive measurement steps beginning from 11 until the boundary value determined in the prognosis is reached

Przedstawiona na rysunku 5 analiza prognozy symptomu pokazuje, jak zmieniają się współczynniki modelu wykładniczego oraz wartość współczynnika determinacji R^2 w kolejnych krokach pomiarowych (dostarczane są kolejne obserwacje). Współczynniki modelu nie ulegają istotnym zmianom, jak również wartość R^2 nie ulega dużym zmianom i wynosi od 0.89 - 0.95, co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu.

Na rysunkach 5a do 5m przedstawiono liczbę kroków prognozy (punktów obserwacji), z których wynika, jak długo według aktualnej prognozy dany silnik może pracować, aż symptom reprezentujący jego stan osiągnie wartość graniczną. W tym przypadku wartość graniczna oznacza wyłączenie silnika z eksploatacji ze względu na możliwość jego uszkodzenia (przejścia w stan niezdadności). Na ostatnim rysunku 5m prognoza wykazała 1 krok pomiarowy do osiągnięcia wartości granicznej przez symptom. Ten fakt został potwierdzony z obserwacji tego silnika, gdyż tuż przed ostatnim planowanym pomiarem (nie zrealizowanym) nastąpiło zatarcie wału korbowego tego silnika.

Znamienny jest fakt, że w okresie normalnej eksploatacji silnika, kiedy to procesy zużycia są ustabilizowane (II-okres krzywej zużycia), wartość współczynnika determinacji R^2 osiąga największe swoje wartości. W tym okresie zmiany symptomu są stałe, nie wykazują dużych zmian, co potwierdza fakt, że symptom ten dobrze odwzorowuje zmiany stanu technicznego silnika.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie analiza prognozowania stanu technicznego silnika, od pewnego etapu jego eksploatacji, przy wyznaczonym modelu trendu symptomu opartym na klasycznych modelach tendencji rozwojowych, wykazała ich przydatność do prognozowania w eksploatacji.

Prognozowanie stanu obiektu począwszy od przyjętego etapu jego eksploatacji jest prognozowaniem średniookresowym. Takie prognozowanie jak zaznaczono wcześniej, jest trwałe i wolne od istotnych zakłóceń losowych trendu i umożliwia również prognozę na krótkie okresy (prognozy krótkookresowe). Rozpoczęcie prognozowania od początku eksploatacji obiektu (przy znajomości modelu trendu) symptomu jest prognozowaniem długookresowym, a w związku z tym obarczone może być dużymi błędami wynikającymi z zakłóceń losowych.

Prognozowanie przy znanym modelu trendu symptomu wymaga jednak znajomości modelu opisującego trend symptomu. Model taki można wyznaczyć na podstawie obserwacji grupy takich samych obiektów będących w różnych stanach wyeksploatowania lub przyjmując kilka modeli i w kolejnych krokach prognozowania odrzucić te, które posiadają niskie wartości współczynnika determinacji R^2 . Jednak najlepszym rozwiązaniem jest rozpoczęcie prognozowania po uzyskaniu minimum 10 punktów obserwacji, tak aby dobrze opisać trend symptomu. Przy założeniu, że nowy obiekt w początkowym okresie eksploatacji zachowuje się poprawnie, prognozowanie stanu obiektu nie jest konieczne. Prognozowanie stanu ma sens dopiero po pewnym czasie wyeksploatowania obiektu, kiedy procesy zużyciowe intensyfikują się. Takie podejście zaproponowano do oceny stanu technicznego silników spalinowych pojazdów szynowych, prognozując ich stan począwszy od 11 obserwacji.

LITERATURA

1. Tomaszewski F.: Wyniki eksploatacyjnych badań diagnostycznych silników spalinowych 2112SSF w eksploatacji. Materiały z badań, nie publikowany.
2. Tomaszewski F.: Możliwości prognozowania stanu technicznego silnika spalinowego lokomotywy. XII Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe'96”. Rydzyna 21-24 października 1996, s. 287-292.
3. Zaliaś A.: Teoria prognozy. PWE, Warszawa 1979.

Abstract

An analysis of engine technical condition prognostication in the paper revealed its suitability. Applied here prognostication beginning from a certain moment of operation is so called medium range prognostication. This kind of prognostication is steady and free from essential random distortions of trend and also allows prognosis for shorter periods. Beginning the prognostication at the beginning of object operation is a long range prognostication that can be burdened with considerable errors. In this paper the prognostication of engine technical condition has been commenced from the 11 th observation.