

## ANALIZA MODALNA W DIAGNOZOWANIU PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

**Bogdan ŻÓLTOWSKI**  
**Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów**  
**ATR Bydgoszcz**

### Streszczenie

Zwiększające się zapotrzebowanie na metody i środki diagnostyki technicznej, będące narzędziem nowoczesnego sposobu kreowania "jakości" maszyn, wychodzi jak dotąd na przeciw potrzebom zużytego potencjału obiektów w zakresie podtrzymania ich użytkowania. Analiza modalna (eksperymentalna i eksploatacyjna) staje się nowym narzędziem wspomaganie przy decyzjach o stanie maszyn.

### 1. Diagnostyka w eksploatacji maszyn

Rosnący stopień złożoności maszyn i krytyczność ich funkcji ze względów bezpieczeństwa i ekonomicznych zmuszają konstruktorów i użytkowników tych obiektów do nadzorowania ich bieżącego stanu technicznego i prognostycznie zorientowanego użytkowania. Jest to możliwe, jeśli na etapie użytkowania lub lepiej konstruowania zintegrowane zostaną z obiektem urządzenia i procedury diagnostyczne.

Problemy diagnostyki maszyn obejmują zagadnienia:

- pozyskiwania i przetwarzanie informacji diagnostycznej;
- budowy modeli i relacji związania;
- wnioskowania prognostycznego i wartości granicznych;
- klasyfikacji stanów maszyny;
- obrazowania informacji decyzyjnych.

System pomiarowy dla celów współczesnej diagnostyki maszyn składa się z dwóch podstawowych części:

- **sprzętu**, w którym wyróżnia się następujące moduły:
  - podsystem kondycjonowania i przetwarzania sygnałów,
  - podsystem przetwarzania sygnałów znacznika fazy,
  - podsystem komputera przemysłowego,
  - podsystem zasilania,
- **oprogramowania**, w którego skład wchodzi następujące moduły:
  - system operacyjny,

- oprogramowanie modułów przetwarzania i analizy sygnałów,
- oprogramowanie komunikacji pomiędzy warstwami systemu,
- oprogramowanie do archiwizacji i przetwarzania danych pomiarowych,
- oprogramowanie zarządzające pracą systemu.

Zastosowane rozwiązania umożliwiają łatwą rozbudowę systemu, oraz możliwości włączenia go do dowolnych struktur systemów diagnostycznych.

Współczesne maszyny określane są poprzez: funkcjonalność, niezawodność, gotowość, bezpieczeństwo, mobilność i podatność eksploatacyjna. Kształtowanie tych cech jest możliwe metodami diagnostyki technicznej, która umożliwia :

- diagnostyczne konstruowanie i wytwarzanie nowych maszyn;
- utrzymanie maszyn w stanie zdatności funkcjonalnej.

Potrzeby gospodarki rynkowej uzasadniają konieczność wprowadzania nowoczesnej **prognostycznej strategii istnienia maszyn**. W propozycji tej strategii nie traci się dotychczasowych dokonań najnowszej strategii eksploatacji według stanu, lecz twórczo się ją modernizuje. Sama idea tej strategii opiera się na wykorzystaniu "pętli jakości", którą uzupełniono elementami teorii eksploatacji (fazy istnienia maszyny, serwis) oraz diagnostyki technicznej.

Użytkownicy maszyn są zainteresowani szczególnie ich zdatnością zadaniową, dla określenia której należy:

- wyznaczyć symptomy stanu zdatności;
- określić wartości graniczne symptomów stanu zdatności,
- ustalić klasę zdatności obiektu.
- wyznaczyć okresowość diagnozowania.

### 2. Kierunki badań w DT

Zagadnienia metodyczne DT skupiają się aktualnie na rozwijaniu i doskonaleniu problematyki diagnozowania symptomowego i holistycznego. W tym zakresie obserwuje się pewne wysycenie zagadnień naukowych, gdyż opis symptomowy stanu maszyn jest dobrze opanowany i często także ułatwia rozwiązywanie trudnych problemów diagno-

styki holistycznej. Tu właśnie problemy opisu strukturalnego wskazują na konieczność przeniesienia trudu tych rozważań na możliwości nowoczesnych metod badania stanu dynamicznego. Dają one ogromne perspektywy szczególnie w zakresie indywidualizacji diagnostyki.

W tej pracy podjęto problem opisu eksperymentu czynnego dla potrzeb wyznaczenia wartości parametrów diagnostycznych, jak i kolejnego terminu diagnozowania i obsługiwania.

Problemy stosowania analizy modalnej w diagnostyce obiektów można sprowadzić do następujących działań:

- zdefiniowanie listy uszkodzeń,
- określenie typowych obrazów odpowiadających konkretnym stanom obiektu,
- wyznaczenie modeli modalnych wyróżnionych stanów przekładni;
- porównanie wyników.

### 3. Metodyka wyboru parametrów diagnostycznych

Dla potrzeb prognostycznego systemu eksploatacji maszyn w tej pracy rozpoznano zagadnienia:

- wyboru wrażliwych uszkodzeniowo symptomów stanu, na przykładzie modelowej przekładni zębatej, w eksperymencie czynnym;
- budowy wektora cech stanu dla badanej przekładni;
- pozyskiwania danych z eksperymentu dla potrzeb prognozowania wartości parametrów diagnostycznych oraz wyznaczania terminów kolejnych diagnozowań.

#### 3.1. Obiekt badań

Wyboru symptomów diagnostycznych i oceny ich wrażliwości na modelowane zmiany stanu dokonano w wyniku przeprowadzenia eksperymentu czynnego z użyciem modelu przekładni zębatej DMG-1 [wykonanej w ITE Radom].

Eksperyment czynny polegał na celowej zmianie dostępnych cech stanu (przyczyn) i obserwacji parametrów drgań (skutków), jakie te zmiany powodują.

Dla badanego modelu przekładni zębatej (rys.1), skonstruowano wektor cech stanu przekładni z uwzględnieniem wszystkich możliwych kombinacji uszkodzeń:

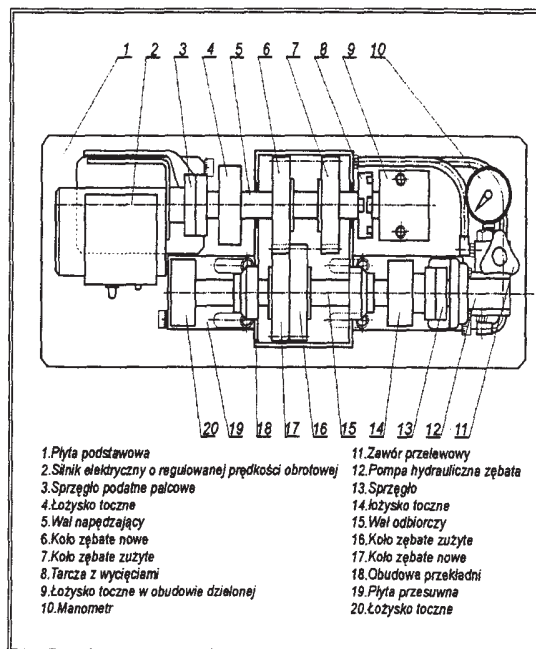
*stan 1* – brak uszkodzeń – przekładnia zdalna (wszystkie parametry w normie),

*stan 2* – uszkodzenie elementu – (niektóre parametry poza normą),

... - możliwe kombinacje programowanych uszkodzeń i rozregulowań,

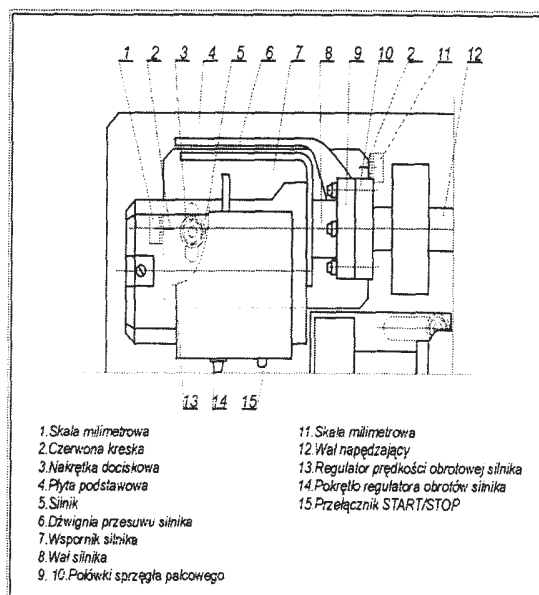
*stan n* – stan rozregulowania (wszystkie parametry poza normą).

Pozwoliło to na wstępne wyróżnienie wielu stanów regulowanych, dla których rejestrowano odpowiadające im wartości parametrów diagnostycznych.



Rys.1. Ogólny widok badanej przekładni

Układ sterowania, przedstawiony na rys.2, umożliwia realizację zaplanowanych warunków badań.



Rys.2. Układ sterowania przekładni

Wektor cech stanu przekładni po badaniach wstępnych uściślono do następujących stanów:

1. brak uszkodzeń,
2. uszkodzone łożysko,
3. koło zębate napędowe zużyte,
3. koło zębate uszkodzone – wyłamany ząb,
4. koło zębate wału napędowego uszkodzone – wykruszony ząb,
5. koło zębate odbiorcze zużyte,
6. koło zębate wału odbiorczego uszkodzone – wyłamany ząb,
7. koło zębate wału odbiorczego uszkodzone – wykruszony ząb,
8. wał napędowy nie wyważony,
9. wał odbiorczy nie wyważony,
10. przekoszenie (+1°;-2°) wału napędowego,
11. przekoszenie (+1°;-2°) wału odbiorczego.

### 3.2. Stanowisko pomiarowe

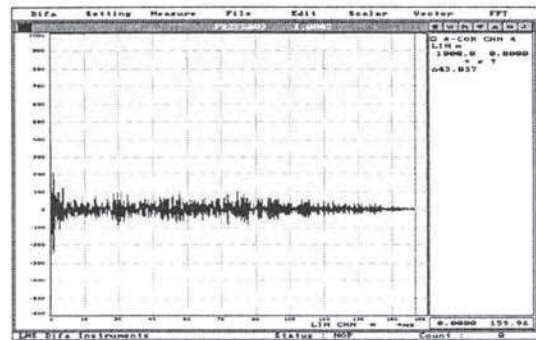
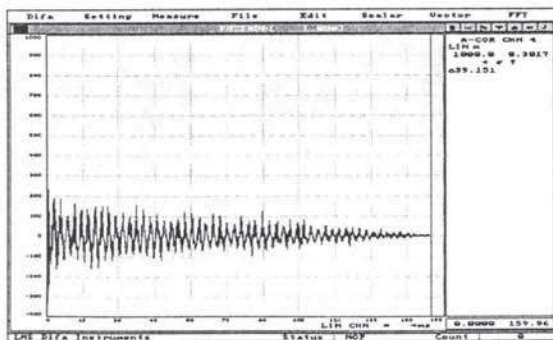
Pomiary parametrów sygnału drganiowego (rys.3) przeprowadzono z zastosowaniem pakietu pomiarowego – APB – 200, wchodzącego w skład oprogramowania CADA-PC.



Rys.3 Schemat stanowiska pomiarowego.

### 3.3. Przykładowe wyniki badań

Rys.4 ACR – autokorelacja



Układ umożliwia wyznaczenie:

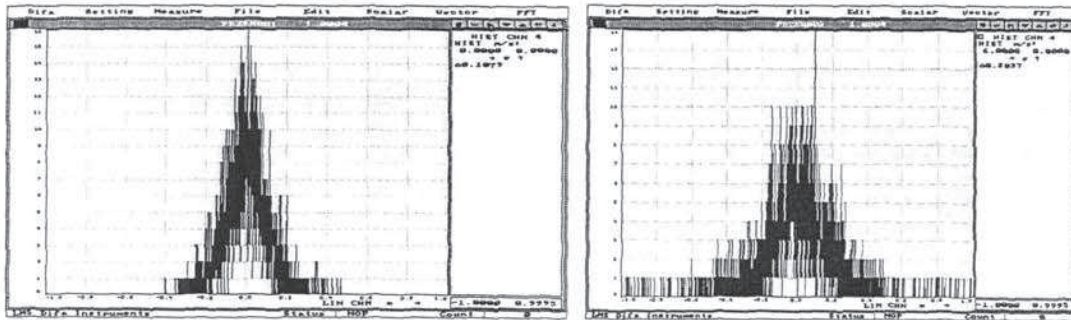
1. TIME-przebieg czasowy sygnału,
2. ACR - autokorelacja,
3. CEPS - cepstrum,
4. HISS - histogram amplitud,
5. AMPL - widmo amplitudowe,
6. POWER-gęstość widmowa mocy.

Dalsze przetwarzanie tych miar sygnału pozwala uzyskać całą gamę miar i dyskryminant szczegółowych procesu drganiowego, które wykorzystane zostaną do oceny ich wrażliwości na modelowane stany przekładni. Należą do nich:

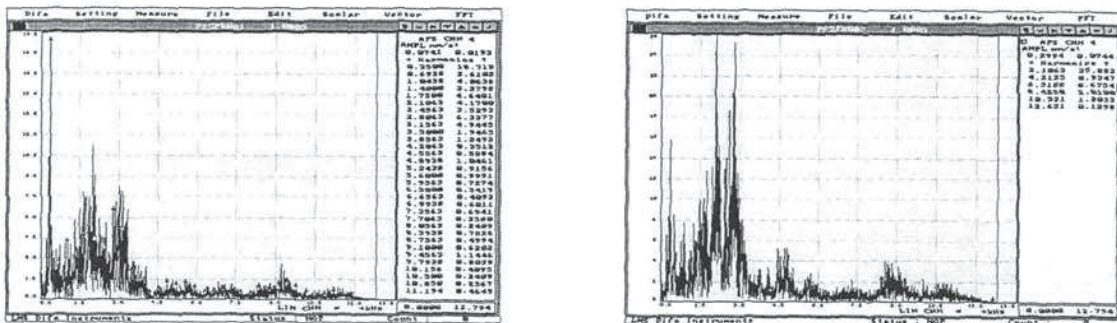
1. peaklist – wartości maksymalne amplitudy w częstościach charakterystycznych;
2. wyższe harmoniczne i ich amplitudy,
3. wartość maksymalna amplitudy drgań,
4. wartość minimalna amplitudy drgań,
5. wartość międzyszczytowa, określana na podstawie wartości max i min,
6. wartość średnia amplitudy drgań,
7. wartość skuteczna amplitudy drgań,
8. dyskryminanty amplitudowe (C, K, I),
9. moment stat. 1 rzędu - wartość średnia,
10. moment statystyczny 2 rzędu – odchylenie standardowe.



Rys. 5 HISS - histogram amplitud



Rys.6. AMPL - widmo amplitudowe



#### 4. Wybór parametrów prognostycznych

Zbiór parametrów diagnostycznych sygnału wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych, towarzyszących pracy maszyny. Wyznaczanie zbioru wrażliwych uszkodzeniowo parametrów w procesie prognozowania powinno uwzględniać:

- zdolność odwzorowania zmian stanu przekładni w czasie eksploatacji,
- ilość informacji o stanie przekładni,
- wrażliwość parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji.

##### 4.1. Metody redukcji danych

- *Metoda maksymalnej wrażliwości parametru na zmianę stanu* – ze zbioru parametrów wyjściowych przekładni wybiera się parametr, który charakteryzuje się największą wrażliwością.
- *Metoda maksymalnej względnej zmiany parametru diagnostycznego* – uwzględnia się tu średnią prędkość zmiany parametrów w określonym przedziale czasu.
- *Metoda maksymalnej pojemności informacyjnej parametru* – wybór parametru dostarczającego największą ilość informacji o stanie technicznym przekładni.
- *Metoda maksymalnej zmienności parametru diagnostycznego* – parametry diagnostyczne

muszą wykazywać dostateczną zmienność wartości w czasie eksploatacji przekładni.

##### 4.2. Kryteria optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych

1. Parametry diagnostyczne powinny charakteryzować proces pogarszania się stanu zdatności przekładni i być z nim ściśle związane.
2. Parametry diagnostyczne powinny być wrażliwe na zmiany zachodzącego procesu pogarszania się zdatności przekładni.
3. Liczba parametrów diagnostycznych nie może być zbyt duża, gdyż znaczna ich liczba utrudnia, a niekiedy uniemożliwia poznanie i określenie procesu pogarszania się stanu technicznego przekładni.
4. Parametry diagnostyczne powinny mieć charakter mierzalny.
5. Muszą istnieć wiarygodne dane statystyczne parametrów.

##### KRYTERIA

- *Kryterium zmienności opisane wskaźnikiem zmienności;*
- *Kryterium korelacji parametru ze stanem technicznym przekładni.*
- *Kryterium korelacji parametrów diagnostycznych.*  
*Kryterium kosztu diagnozowania.*

#### 4.3. Metody prognozowania:

- *Metoda parametru uogólnionego.*
- *Metoda funkcji regresji.*
- *Metoda wyrównywania wykładni-czego Browna – Mayera rzędu 1 (model liniowy).*
- *Metoda wyrównywania wykładni-czego Browna – Mayera rzędu 2.*

#### 4.4. Kryteria optymalizacji metod prognozowania :

- 1 *kryteria błędu prognozy*, które określają wartość miar niedokładności prognozy;
- 2 *kryteria wiarygodności*, które warunkują dopuszczalność prognoz według prawdopodobieństwa pojawiania się zdarzeń.

#### 5. Wyznaczanie kolejnego terminu diagnozowania

Pewną odmianą zagadnienia prognozowania jest określanie terminu kolejnego diagnozowania przy wykorzystaniu wartości mierzonych symptomów. Jest to możliwe w ujęciu symptomowym, związanym z aktualnym pomiarem symptomu i jego wartością graniczną.

Dokonując  $n$  - pomiarów sygnału (symptomu) i na ich podstawie wyznaczenie wartości granicznej wg zależności:

$$S_{gr} = s + \sigma_s \sqrt{\frac{P_g}{2A}} \quad (1)$$

istnieje możliwość określenia terminu kolejnego diagnozowania  $t_d$  z zależności:

$$t_d = \frac{(1 - P_r)(S_{gr} - S_m)}{S_m} \ominus_m \quad (2)$$

#### 6. Podsumowanie

Patrząc na obecne trendy rozwojowe maszyn trzeba uznać, że współcześnie wzrost ich jakości zawarty jest głównie w sferze automatyzacji i

miniaturyzacji. Gromadzenie cech mierzalnych staje się jedynym obiektywnym sposobem wartościowania i kształtowania jakości maszyn, teraz i w przyszłości. Poszukiwać więc trzeba coraz to lepszych metod i systemów pomiarowo-kontrolnych prowadzących do:

- identyfikacji stanu obiektu i warunków jego użytkowania;
- wyboru wektora cech mierzalnych jakości;
- zredagowania zbioru kryteriów oceny wektora jakości obiektu;
- opracowania automatycznych obserwatorów i akwizytorów cech wektora jakości obiektu w użytkowaniu;
- zautomatyzowania klasyfikacji stanu opartej na własnościach wektora jakości.

Zakres badań w dziedzinie metodologii diagnostyki aktualnie obejmuje takie zagadnienia, jak: źródła informacji diagnostycznej, sygnały i symptomy diagnostyczne, zasady szczegółowych metod diagnostyki, modelowanie i eksperymenty, wspomaganie diagnostyki nowoczesnymi technologiami informatycznymi, diagnozowanie w systemach antropotechnicznych oraz organizacyjne i ekonomiczne aspekty stosowania diagnostyki. Zagadnienia te dotyczą więc w kolejności: źródeł informacji od strony fizycznej i od strony informacyjnej, dalej podstaw metod i technik badawczych, modelowania i eksperymentowania w diagnostyce oraz nowoczesnego wnioskowania i wizualizacji decyzji diagnostyczno - eksploatacyjnych.

#### Literatura

- 1 Cempel C.: Podstawy wibroakustyczne diagnostyki maszyn. WNT, 1982.
- 2 Dybała J., Radkowski S.: Zastosowanie sieci neuronowych w wykrywaniu uszkodzeń w przekładni zębatej. Materiały konfer., Borówno 1999.
- 3 Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Rozprawa habilit. nr 86, ATR Bydgoszcz, 1999.
- 4 Żółtowski B.: Uwarunkowania klasyfikacji stanów w diagnostyce maszyn. Diagnostyka, niezawodność i bezpieczeństwo. Radom-Krynica. KBM PAN 4'97 (27), (s.37 – 51).
- 5 Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wyd. ATR, Bydgoszcz