

## METODYKA BADANIA DRGANIOWEGO PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Zdzisław KRÓLICKI, Bogdan ŻÓŁTOWSKI

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Maszyn Roboczych i Pojazdów  
ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
tel. (52) 340 82 83  
krolicki@atr.bydgoszcz.pl  
bogzol@atr.bydgoszcz.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z badaniami drganiowymi przekładni zębatej. Głównym zagadnieniem jest próba opracowanie oryginalnej metodyki postępowania badawczego. Szczególny nacisk położono na merytoryczną poprawność i odpowiednią kolejność czynności badawczych. Uwzględnione zostały poszczególne etapy postępowania, od procesu planowania, poprzez dobór punktów pomiarowych i wybór symptomów, po redukcję danych.

Słowa kluczowe: sprawność techniczna, przekładnia zębata, badania drganiowe.

### THE TOOTHEAD GEAR VIBRATION INVESTIGATION METHODOLOGY

#### Summary

Qualification his real shape is the main aim of technical objects state analysis relevant with his further exploitation. The modern systems of machines technical state supervision goes to elimination a "human factor", and to gradual supersession of knowledge and experiences of diagnostic services with the automatic diagnostic systems, that working in mode "on - line".

Keywords: efficiency technical, gear teeth, vibration investigation.

## 1. WPROWADZENIE

Dotychczasowe metody oceny pracy przekładni opierają się wciąż jeszcze w dużym stopniu na subiektywnych stwierdzeniach wysoko wykwalifikowanego personelu technicznego. Istnieje więc szczególne zapotrzebowanie na proste urządzenia diagnostyczne, umożliwiające szybkie i obiektywne określenie sprawności technicznej przekładni, w szczególności dla oceny bezdemontażowej.

Przekładnie zębate są generatorem drgań mechanicznych, każde odstępstwo od stanu zdatności a także inne odstępstwa związane z funkcjonowaniem przekładni są uwidaczniane w otrzymanym sygnale diagnostycznym. Należy wybrać takie estymaty sygnału drganiowego przekładni, które umożliwią rozwiązanie zadania diagnostycznego i dadzą jasną odpowiedź na temat stanu przekładni.

## 2. ANALIZA STANU WIEDZY

Prowadzone dotychczas rozważania teoretyczne oraz badania eksperymentalne wskazują, że w

zakresie nowoczesnej diagnostyki technicznej szczególna rola przypada sygnałom diagnostycznym wielowymiarowym, jak: hałas, drgania itp., nieodłącznie związanych z funkcjonowaniem przekładni zębatej. Wykorzystanie sygnału drganiowo – hałasowego bądź procesów dynamicznych pokrewnych w pośredniej ocenie własności przekładni nazwano diagnostyką wibroakustyczną. Udział sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu stanu przekładni zębatej jest obecnie coraz większy, z uwagi na możliwość oceny bezdemontażowej. Do szczególnych własności sygnału wibroakustycznego, jako nośnika informacji zalicza się:

- dużą pojemność informacyjną,
- odwzorowanie najistotniejszych procesów fizycznych zachodzących w przekładni zębatej, (np. odkształcenia, naprężenia itp.),
- fakt, iż jest on integralnie związany ze stanem przekładni,
- dużą szybkość przekazywania informacji.

Celem analizy stanu technicznego badanego obiektu jest określenie jego rzeczywistej kondycji lub inaczej mówiąc, przydatności do dalszej

eksploatacji. Każdorazowo więc, wyznaczony model stan – symptom lub często stan – czas eksploatacji maszyny powinien mieć nie tylko właściwości wyjaśniające naturę przekształcenia, lecz także właściwości predykcyjne umożliwiające przewidywanie zmian stanu maszyny. Ma to szczególne znaczenie dla tzw. maszyn krytycznych, których unieruchomienie może być przyczyną znacznych strat materialnych, a nawet zagrożenia zdrowia i życia ludzi.

Przekładnie zębate są generatorem drgań mechanicznych, każde odstępstwo od stanu zdatności a także inne odstępstwa związane z funkcjonowaniem przekładni są uwidaczniane w otrzymanym sygnale diagnostycznym. Należy wybrać takie estymaty sygnału drganiowego przekładni, które umożliwią rozwiązanie zadania diagnostycznego i dadzą jasną odpowiedź na temat stanu przekładni.

W diagnostyce maszyn możemy wyróżnić wiele metod i sposobów określania zarówno : stanu technicznego maszyny jak i terminu kolejnego przeglądu do którego ta maszyna powinna pracować bez awaryjnie.

Nie jest dzisiaj problemem dla diagnosty – fachowca, zarówno wytypować odpowiednie parametry do analizy jak i dokonać odpowiednich pomiarów. Znane są metody, wzory, można posłużyć się takim czy innym programem komputerowym.

Problem zaczyna się w momencie nagłych, nieprzewidzianych awarii związanych z różnymi defektami (wady materiałowe) jak i wpływami zewnętrznymi (zmęczenie materiału , naprężenia). Wydaje się tu uzasadnionym diagnozowanie w rybie „on-line”, czyli ciągłe monitorowanie stanu pracującego obiektu bez jego wyłączenia. W takiej sytuacji diagnozowanie stanu maszyny staje się już dość problematyczne.

### 3. DIAGNOZOWANIE OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

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 przetwarzania informacji diagnostycznej,
- budowy modeli i relacji diagnostycznych,
- wnioskowania diagnostycznego i wartości granicznych,
- klasyfikacji stanów maszyny,

- przewidywania czasu kolejnego diagnozowania,
- obrazowania informacji decyzyjnych.

### 4. METODYKA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

W diagnostyce technicznej badanymi czynnikami są cechy stanu i parametry generowanych sygnałów diagnostycznych. Uwzględniając problemy występujące podczas opracowania procedur diagnostycznych, można stworzyć odpowiednią metodykę badań diagnostycznych, obejmującą:

- analizę obiektu badań diagnostycznych wraz z wyborem cech stanu obiektu,
- budowę modeli generacji sygnałów diagnostycznych,
- metodykę badań uwzględniającą: formę eksperymentu, wybór punktów pomiarowych oraz wybór miar diagnostycznych,
- budowę kolejnych przybliżeń modelu analitycznego obiektu diagnozy,
- podjęcie decyzji diagnostycznej,
- ocenę wiarygodności diagnozy na każdym etapie podejmowania decyzji,
- opracowanie procedury diagnozowania do zastosowań praktycznych.

Rozwiązanie tych problemów pozwala na opracowanie metodyki postępowania przy budowie użytecznych rozwiązań procedur diagnostycznych dla systemów technicznych.

### 5. PLANOWANIE DOŚWIADCZEŃ

W zastosowaniach praktyki eksperymentalnej wykorzystuje się wybrane plany doświadczeń, których podstawowa klasyfikacja jest następująca.

Wybór właściwego planu doświadczenia stanowi jedną z najważniejszych decyzji na etapie przygotowania eksperymentu. Na podjęte decyzje wpływ miały następujące czynniki:

- informacja o obiekcie badań,
- jakościowy model matematyczny obiektu badań,
- cel badań doświadczalnych.

W wyborze planu istotne są również kryteria wyboru planu doświadczeń jak:

- realizowalność,
- informatywność,
- efektywność.

Konieczność badań doświadczalnych wynika z pełnej lub częściowej nieznajomości związków przyczynowo – skutkowych między czynnikami (wielkościami wejściowymi) a parametrami obiektu badań (wielkościami wyjściowymi). Obiekt badań można przedstawić w postaci modelu jak na rys. 1. Jego parametry Y zależą od pewnej liczby wielkości wejściowych X przy jednoczesnym oddziaływaniu wielkości zakłócających Z oraz istnieniu wielkości

stałych  $c_s$ . Do wielkości zakłócających zaliczane są wielkości niemierzalne i niesterowalne, albo świadomie ustalone.

Wielkości stałe można zmierzyć, ale nie można zmienić lub zmiana taka nie jest celowa bądź konieczna. Statyczne wartości parametrów obiektu badań są funkcjami, zależnymi od działających na obiekt wielkości:

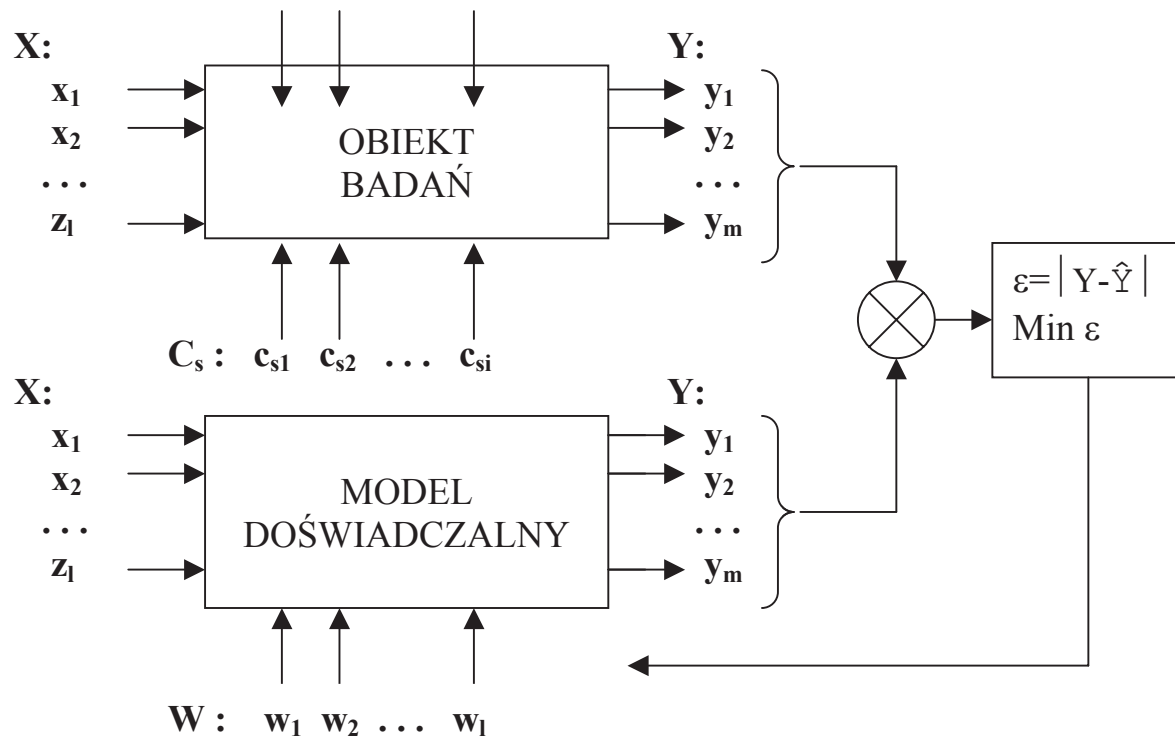
$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_l, z_1, z_2, \dots, z_l, c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{si}) \quad (1)$$

Model doświadczalny jest funkcją wielkości wejściowej  $X$  i współczynników  $W$ :

$$\hat{y}=f(x_1, x_2, \dots, x_l, w_1, w_2, \dots, w_{k+1}) \quad (2)$$

Za pomocą funkcji (2) aproksymowana jest rzeczywista funkcja obiektu badań (1), niewyznaczalna z powodu występowania zakłóceń. Najczęściej można przyjąć, że wartości wielkości stałych  $c_s$  są niezmiennie w określonym czasie badań. Postać funkcji (2) może być wybrana przez badacza. Najczęściej są to wielomiany drugiego stopnia z członami inercyjnymi, uwzględniającymi wpływ łącznego oddziaływania czynników pierwszego rzędu na wartość wielkości wyjściowych, jak np. funkcja:

$$\hat{y}=w_0+\sum_{i=1}^l w_i x_i + \sum_{i=1}^l w_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^l w_{ij} x_i x_j \quad (3)$$



Rys. 1. Model obiektu badań ( $X$  – wielkość wejściowa,  $C_s$  – wielkości stałe,  $Z$  – wielkości zakłócające,  $W$  – współczynniki,  $Y$  – wielkości wyjściowe,  $\otimes$  - porównanie

Najpopularniejszą metodą wyznaczania współczynników w funkcji (3) jest metoda najmniejszych kwadratów, ze względu na uniwersalność i prostotę.

W ogólnym przypadku, przy wyznaczaniu doświadczalnego modelu obiektu, poszukuje się współczynników funkcji regresji (3), która może być zapisana w postaci:

$$\hat{y}=w_0 f_0(\bar{x}) + w_1 f_1(\bar{x}) + \dots + w_k f_k(\bar{x}) \quad (4)$$

gdzie:  $f_k(\bar{x})$  - funkcja liniowo niezależna o argumentach  $\bar{x} = x_1, x_2, \dots, x_l$

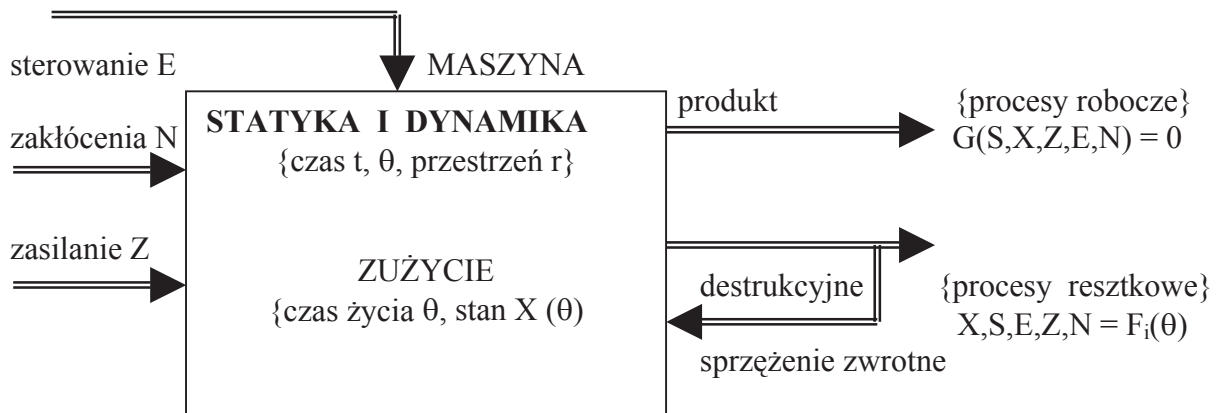
Problem wyboru odpowiedniego układu wartości wielkości wejściowej  $x$ , dobranej ze względu na przyjęte kryteria, jest przedmiotem planowania eksperymentu.

## 6. MODEL DIAGNOSTYCZNY OBIEKTU

Najbardziej ogólny model obiektu dla potrzeb diagnostyki technicznej przedstawiono na rys. 2.

Stan techniczny obiektu można tu określać obserwując funkcjonowanie obiektu, tzn. jego wyjście główne przekształconej energii (lub produktu) oraz wyjście dyssypacyjne, gdzie obserwujemy różnego typu procesy resztkowe

(termiczne, wibracyjne, akustyczne, elektromagnetyczne).



Rys. 2. Model diagnostyczny obiektu

Wektorowy opis struktury obiektu, jego wejść: zasilania, sterowania i zakłóceń oraz wyjść energetycznych (użytecznych i resztkowych) prowadzi bezpośrednio do opisu możliwych związków pomiędzy zmiennymi.

Opis modelu obiektu diagnostyki zależy od postawionego celu badań, przyjętej struktury modelu i wyboru zmiennych stanu. Wybrane zmienne stanu powinny z jednej strony zabezpieczać wystarczająco wierny opis interesujących nas zjawisk i procesów przebiegających w maszynie, a z drugiej strony – umożliwiać otrzymanie możliwie prostych zależności matematycznych, określających związki przyczynowo skutkowe.

Budowa efektywnych modeli diagnostycznych dla wielowymiarowych obiektów złożonych, objętych sprzężeniami zwrotnymi (do których zaliczane są maszyny), napotyka na duże trudności. Główne powody tego są następujące:

- zmienne warunki pracy maszyny;
- maskowanie informacji diagnostycznej;
- trudności wprowadzenia określonych stanów zużycia lub stopnia uszkodzenia elementów;
- nieznaną torów rozprzestrzeniania się sygnałów diagnostycznych od miejsc uszkodzeń do punktów odbioru w złożonym obiekcie;
- inne.

Częściowe ominięcie opisanych trudności daje poprawne zamodelowanie badanej maszyny i wszelkie poczynania optymalizacyjne w budowanej dalej procedurze diagnostycznej.

Jest to metodologia ogólna modelowania. Wynikiem są modele diagnostyczne obiektów – model: regresyjny, holistyczne, rozmyte, binarna

macierz diagnostyczna, probabilistyczna macierz obserwacji, etc., o czym będzie mowa później.

## 7. WYBÓR MIAR DIAGNOSTYCZNYCH

Sygnały losowe określane są na zbiorze realizacji w ograniczonym przedziale czasu. Zmierzony sygnał losowy można uważać za odcinek jednej realizacji procesu losowego, a wartości cech sygnału losowego powinny być wyznaczone na podstawie analizy wszystkich jego realizacji. Dlatego wprowadzono pojęcie estymatora, tj. oceny wartości cech zmiennej losowej, dokonanej na podstawie analizy próby o ograniczonej liczności wartości tej zmiennej. Estymator powinien w szczególności być:

- nieobciążony- gdy jego wartość oczekiwana jest równa wartości ocenianej cechy,
- zgodny – jeśli ze wzrostem liczności próby, z której jest on wyznaczony, wartość estymatora dąży do wartości ocenianej cechy z prawdopodobieństwem dążącym do jedności.

W diagnostyce często są wykorzystywane sygnały losowe stacjonarne i ergodyczne. Dla zastosowań praktycznych wystarczy przyjąć, że sygnały stacjonarne to takie, których uśrednione cechy nie są zmienne w czasie, mają więc wartość średnią stałą w czasie, a funkcja autokorelacji jest funkcją tylko przesunięcia czasowego. Ergodyczność sygnału losowego w praktyce oznacza natomiast możliwość wyznaczenia wszystkich jego cech probabilistycznych przy pomocy operatora uśredniania w wyniku analizy jednej realizacji sygnału obserwowanego.

Statystyczny opis właściwości sygnałów losowych prowadzi się przy wykorzystaniu różnych wielkości, jak:

- wartość średnia,
- wariancja,
- wartość średniokwadratowa,
- funkcja autokorelacji,
- funkcja korelacji wzajemnej,
- gęstość widmowa,
- widmo mocy,
- wzajemna gęstość widmowa,
- funkcja koherencji zwyczajnej,
- ...

Wykorzystanie danych, zbieranych w nadmiarze w eksperymencie i uzyskiwanych podczas przetwarzania, do podjęcia decyzji o stanie maszyny często nie jest ani możliwe ani konieczne. Naturalne jest więc dążenie do redukcji danych początkowych, obejmujących zbiory obiektów oraz opisujących je informacji, które winny zostać zastąpione przez stosunkowo niewielkie zbiory danych odpowiednio uporządkowanych.

Dla problemu selekcji informacji duże znaczenie mają metody redukcji które:

- minimalizują ryzyko lub średnie prawdopodobieństwo błędu klasyfikacji obiektu,
- maksymalizują przyjętą funkcję celu,
- maksymalizują wskaźniki informatywności cech.

## 8. PLANOWANIE EKSPERYMENTU

W badaniach diagnostycznych wyróżnia się trzy rodzaje eksperymentów:

- czynny – polegający na celowej zmianie dostępnych parametrów stanu i obserwacji WA, jakie te zmiany powodują. W większości przypadków takich badań zmiana parametrów stanu wymaga demontażu maszyny.
- bierny – polegający na obserwacji parametrów sygnału WA bez znajomości parametrów stanu, lecz z ewentualną możliwością kontroli sterowania i obciążenia jako zmiennych zakłócających. Możliwe są tutaj dwa warianty tego samego typu eksperymentu:
  - obserwacja sygnałów WA obiektu od momentu pierwszego uruchomienia aż do czasu jego uszkodzenia zużyciowego,
  - równoczesna obserwacja parametrów sygnałów WA w dostatecznie dużej próbie N takich samych obiektów w różnych stanach eksploatacyjnych
- bierny – czynny – polegający na obserwacji parametrów sygnału WA z równoczesnym pomiarem parametrów stanu dla jednej lub dwu wartości czasu eksploatacji, jednak bez możliwości ingerencji w wartości parametrów stanu..

## 9. WPLYW LOKALIZACJI CZUJNIKÓW POMIAROWYCH NA WARTOŚCI PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Teoretyczne przesłanki prowadzenia badań w obecności zakłóceń uzasadniają wagę właściwego wyboru punktów pomiarowych. Biorąc pod uwagę wczesne wykrycie rozwijającego się uszkodzenia należy zminimalizować wpływ odległości od miejsca powstawania symptomu z dwóch powodów:

- charakterystyczne dla tworzywa konstrukcyjnego tłumienie energii dyssypowanej przez uszkodzenie, rosnące ze wzrostem częstotliwości,
- własności rezonansowe konstrukcji obiektu.

Miejsce pomiaru i jego kierunek muszą charakteryzować się dużą dynamiką amplitudy i małymi zniekształceniami selektywnymi na drodze uszkodzenie – miejsce odbioru. W praktyce, miejsce odbioru sygnałów ustalane jest w oparciu o znajomość modelu funkcjonalnego obiektu i jego modeli generacji sygnałów.

Nie zawsze jednak wyselekcjonowana strefa powstawania uszkodzeń jest dostępna pomiarowo (np. zazębienie kół, węzeł łożyska wewnętrznego itd.), co determinuje konieczność stosowania miar analitycznych w wyborze tych punktów. Zadanie to można wykonać stosując jedną z miar podobieństwa procesów generowanych w różnych punktach maszyny, ukazujących lokalny stopień podobieństwa między tymi procesami.

Dobre własności separacji punktów odbioru sygnału posiada funkcja koherencji, określona zależnością

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \leq 1 \quad (5)$$

wspomagana dodatkowymi wielkościami kryterialnymi:

- ilością informacji między punktami  $In_{xy}(\Theta_i)$ , zdefiniowaną jako:

$$In_{xy}(\Theta) = \sum_{x=1}^l \lg \frac{1}{1-\gamma_{mn}^2(f_x, \Delta f_x, \Theta_i)} \quad (6)$$

dająca zróżnicowanie informacji dla potrzeb diagnostyki w postaci  $\min \gamma_{xy}^2(f, \Delta f, \Theta_i)$ ;

- trafnością decyzji wyboru  $T_d(\Theta_i)$ , dającą informację oczekiwaną według kryterium  $\max T_d(\Theta_i)$ , zdefiniowaną jako:

$$T_d(\Theta_i) = \frac{P_g * P_z(S_m)}{P_g * P_z(S_m) + (1 - P_g)[1 - P_z(S_m)]} \quad (7)$$

gdzie:  $P_g$  – prawdopodobieństwo zdadności obiektu;

$P_z(S_m) = \prod_{j=1}^m P(S_j)$  – łączne prawdopodobieństwo nie przekroczenia wartości granicznej.

Algorytm wyboru punktów odbioru sygnału, sformułowany w postaci procedury adaptacyjnej jest realizowany w następujących krokach:

1. dokonać wstępnego wyboru dla  $\Theta = \Theta_1$  m-punktów odbioru sygnału, korzystając z przeprowadzonej analizy konstrukcyjnej i funkcjonalnej oraz dostępności maszyny,
2. wyznaczyć  $\gamma_{xy}^2(f)$  pomiędzy przyjętymi wstępnie punktami, uzyskując jednocześnie wartości współczynnika koherencji  $\gamma_{xy}^2(f, \Delta f, \Theta_i)$ ,
3. ustalić wartość graniczną funkcji koherencji z zależności (5),
4. ustalić podobieństwo informacyjne między punktami wg zależności (6),
5. ocenić trafność doboru punktów pomiarowych z zależności (7),
6. dokonać oceny zbędności wg kryteriów:  
 $T_d(\Theta_i)$  – małe, ...  $\ln_{xy}(\Theta_i)$  – małe, ...  $\gamma_{xy}^2(f)$  – duże,
7. podobnie postępując dla  $\Theta = \Theta_{2..i}$  przeprowadzić końcowy wybór punktów pomiarowych.

## 10. PODSUMOWANIE

Celem analizy stanu technicznego badanego obiektu jest określenie jego rzeczywistej kondycji lub inaczej mówiąc, przydatności do dalszej eksploatacji. Nowoczesne systemy nadzoru stanu technicznego maszyn zmierzają do eliminacji tzw. „czynnika ludzkiego”, do stopniowego zastępowania wiedzy i doświadczeń służb diagnostycznych automatycznymi systemami diagnostycznymi pracującymi w trybie „on-line”.

## LITERATURA

1. Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
2. Żółtowski B., Królicki Z.: *Prognozowanie stanu przekładni zębatej – Problemy Budowy Oraz Eksploatacji Maszyn I Urządzeń Rolniczych – VIII Międzynarodowe Sympozjum im. Prof. Czesława Kanafojskiego*, Płock 2000.
3. Królicki Z.: *Modele przekładni zębatej w aspekcie metod analizy stanu – XI Konferencja „Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów” i „III Forum Młodych 2002”*, Bydgoszcz – Borówno.
4. Królicki Z.: *Zastosowanie sieci neuronowych w diagnozowaniu obiektów technicznych*, Sesja Naukowa, Bydgoszcz 2002.

---

Mgr inż. Zdzisław KRÓLICKI – informacje o Autorze na 88 str.

Prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI – informacje o Autorze na 76 str.