

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

1(1)/2013, 47-56

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Ewa KULIŚ, Bogdan ŻÓŁTOWSKI

**ZDATNOŚĆ ZADANIOWA POJAZDÓW**

**Streszczenie:** Narzędziem zyskującym coraz większe uznanie w zakresie kształtowania jakości systemów jest diagnostyka techniczna, jej metody i urządzenia, umożliwiające śledzenie zmian stanu i doskonalące systemy efektywnego wykorzystania maszyn. Aby określić zakres zastosowań diagnostyki technicznej, celem jest przeanalizowanie całego okresu istnienia dowolnego obiektu oraz jego zdolności do wykonywania założonych zadań, wyselekcjonowanie sytuacji, w których uwzględnianie działań diagnostycznych jest niezbędne.

**Słowa kluczowe:** niezawodność, zdolność pojazdu, diagnostyka eksploatacyjna

**1. CEL OPRACOWANIA**

Celem opracowania jest przybliżenie zastosowania niektórych dziedzin diagnostyki technicznej, jej metod umożliwiających śledzenie zmian stanu w celu efektywnego wykorzystania maszyn.

**2. WSTĘP**

Diagnostyka techniczna to zorganizowany zbiór metod i środków do oceny stanu technicznego (jego przyczyn, ewolucji i konsekwencji) systemów technicznych. W większości przypadków są to systemy działaniowe, celowo zaprojektowane dla wykonania określonej misji, generujące lub transformujące informacje, które są wykorzystywane do oceny ich stanu technicznego [1, 6].

Potrzeba stosowania diagnostyki znajduje swoje uzasadnienie w modelu destrukcji obiektu, uwzględniającym związek zaawansowania zużycia proporcjonalny do energii dyssypacji, wiążący się z czasem istnienia obiektu, poziomem konstrukcji, nowoczesności technologii wytwarzania, intensywności użytkowania oraz jakości obsługi technicznej.

Diagnostyka techniczna jest to więc uznana już dziedzina wiedzy o rozpoznawaniu stanów obiektów technicznych w teraźniejszości, przyszłości i przeszłości. Obiektem badań diagnostyki technicznej może być cały obiekt, zespół, podzespół, a nawet pojedyncza część, coraz częściej na kolejnych etapach ich istnienia.

Problemy diagnostyki maszyn obejmują zagadnienia:

- a) pozyskiwania i przetwarzanie informacji diagnostycznej,
- b) budowy modeli i relacji diagnostycznych,

---

mgr inż. Ewa KULIŚ, prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI,  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej,  
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: ekukla@utp.edu.pl

- c) wnioskowania diagnostycznego i wyznaczania wartości granicznych,
- d) klasyfikacji stanów maszyny,
- e) przewidywania czasu kolejnego diagnozowania,
- f) obrazowania informacji decyzyjnych.

#### Niezawodność

Teoria niezawodności zajmuje się metodami syntezy i analizy oraz badań niezawodności maszyn na etapie projektowania, wytwarzania i eksploatacji.

Niezawodność to zespół właściwości, które opisują gotowość maszyny i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi.

Definicja ta jest odpowiednikiem często jeszcze przywoływanej normy, gdzie: „niezawodność to właściwość obiektu charakteryzująca jego zdolność do wykonywania określonych funkcji, w określonych warunkach i w określonym przedziale czasu” [5]. Termin ten oznaczał właściwość kompleksową, obejmującą takie właściwości, jak: nieuszkodzalność, trwałość, naprawialność i przechowywalność.

Badania niezawodności mają głównie na celu opracowanie sposobów postępowania prowadzących do budowy maszyn, charakteryzujących się możliwie największą niezawodnością w aktualnych warunkach eksploatacji. Realizacja tego celu wymaga określenia ilościowych miar niezawodności, opracowania metod przeprowadzania badań i oceny niezawodności, znalezienia sposobów wykrywania przyczyn powodujących uszkodzenia, zbadania możliwości usunięcia tych przyczyn lub zmniejszenia ich intensywności, zapobiegania uszkodzeniom przez stosowne procedury obsługowe.

Rozwiązywanie problemów niezawodności maszyn sprowadza się do:

- opracowania sformalizowanych modeli oceny ich niezawodności,
- ustalenia optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych,
- ustalenia optymalnych technologii wytwarzania,
- prognozowania niezawodności pojazdów w trakcie ich eksploatacji,
- opracowania efektywnych systemów eksploatacji.

Kształtowanie niezawodności maszyn jest możliwe poprzez:

- a) uwzględnienie trwałości i niezawodności maszyn w konstruowaniu i technologii wytwarzania,
- b) wdrożenie programów i metod badań eksploatacyjnych trwałości i niezawodności maszyn oraz ustalenie stanów granicznych w celu wykrycia słabych ogniw;
- c) wprowadzenie metod i kryteriów oceny technicznej i ekonomicznej trwałości i niezawodności maszyn.

Realizacja tych celów winna doprowadzić do zwiększenia efektywności maszyn, ich gotowości i zdolności produkcyjnych, zmniejszenia kosztów eksploatacji, w tym kosztów użytkowania, obsługiwań technicznych, części zamiennych i materiałów eksploatacyjnych. Teoria i badania niezawodności ma-

szyn muszą przy tym dotyczyć projektowania – wytwarzania – eksploatacji, połączonych funkcjonalnie z kreowaniem potrzeby.

### 3. DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA

Najwięcej wymagań wiąże się ze sferą eksploatacji produktów. Jest to zrozumiałe, gdy za rację bytu obiektu uznamy jego użytkowanie. W tym zakresie można wyróżnić:

- a) wymagania trwałościowo-niezawodnościowe,
- b) wymagania efektywności stosowania wyrobów (sprawność, wydajność, koszty),
- c) wymagania związane bezpośrednio z użytkowaniem (uniwersalność, łatwość obsługi, podatność odnowy, automatyzacja),
- d) wymagania związane z oddziaływaniem na otoczenie (cichobieżność, bezpieczeństwo, ergonomia, zanieczyszczenie środowiska).

Można zatem przyjąć, że najszersze oddziaływanie diagnozowania na stan obiektu występuje podczas jego eksploatacji. Uwzględnić należy dwojakie zapotrzebowanie na decyzje diagnostyczne:

- 1) ze strony użytkownika, dla którego ważne są następujące efekty:
  - a) określenie, czy obiekt funkcjonuje (lub może funkcjonować) prawidłowo – diagnozy użytkowe uzyskane w wyniku badania właściwości funkcjonalnych obiektu (kontrola funkcjonowania),
  - b) wyznaczenie prognozy dotyczącej oczekiwanego okresu zdatności obiektu – jest to zwykle wyznaczenie prawdopodobieństwa poprawnej pracy w zadanym okresie czasu;
- 2) ze strony obsługującego obiekt, dla którego ważna jest:
  - a) możliwość lokalizacji każdego uszkodzenia (uzyskanie dostatecznie dokładnych diagnoz obsługowych),
  - b) określenie przyczyny uszkodzenia,
  - c) wyznaczenie danych umożliwiających określenie podstawowych parametrów procesu naprawy (średni czas naprawy, prawdopodobieństwo naprawienia w zadanym czasie, oczekiwany koszt naprawy),
  - d) wyznaczenie danych umożliwiających oszacowanie parametrów procesu odnowy (średni czas do następnego uszkodzenia, oczekiwany czas do kolejnych badań i prac profilaktycznych).

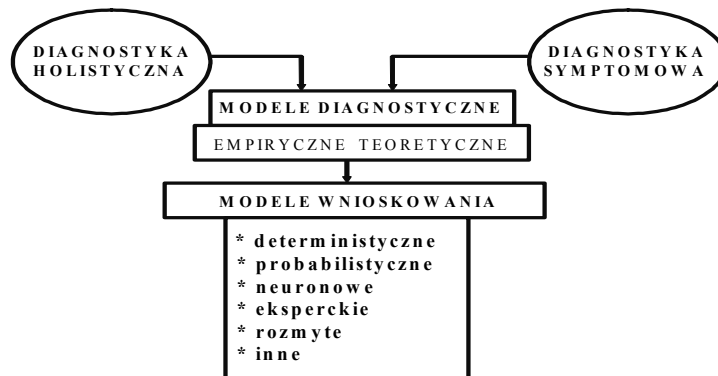
Efektem opracowania procesu diagnozowania dla okresu eksploatacji obiektu są zwykle odpowiednie rozdziały w instrukcjach użytkowania i obsługi, traktujące o zasadach wykorzystania diagnostyki. W instrukcji użytkowania podaje się:

- a) zależności funkcyjne, cechy stanu, symptomy i ich wartości opisujące stan zdatności obiektu,
- b) punkty kontrolne i metody badań.

Opracowując instrukcję dąży się do minimalizacji liczby badanych wielkości i poszukuje się parametru uogólnionego, tj. wielkości, której wartość (często logiczna: "jest – nie jest") pozwala wnioskować o stanie całości obiektu, nawet kosztem obniżenia wiarygodności kontroli. Takie podejście jest niezbędne w przypadkach, gdy użytkownik nie ma dostatecznych kwalifikacji do prowadzenia diagnozowania i obsługiwanego obiektu.

#### 4. WNIOSKOWANIE DIAGNOSTYCZNE

Wnioskowanie diagnostyczne jest głównym etapem wypracowywania decyzji w procesie diagnozowania i zgodnie z rysunkiem 1 oparte jest na przyjętym modelu diagnostycznym, pozwalającym na jawne lub niejawne odwzorowanie relacji: symptomy-stan.



Rys. 1. Metody wnioskowania diagnostycznego [8]  
Fig. 1. Methods of diagnostic inference [8]

Rzeczywisty stan eksploatacyjny maszyny w kategoriach jednego uszkodzenia ilościowo odzwierciedla krzywa życia  $F_j$ . Dla wielowymiarowej przestrzeni uszkodzeń rzeczywistych obiektów [2, 6, 8]:

$$X_i(\Theta) = \sum_{j=1}^n a_{ij} F_j(\Theta) \quad (1)$$

gdzie:

$a_{ij}$  – współczynniki wagi liniowego rozwinięcia relacji między mierzalnymi cechami stanu

$X_i(\Theta)$  a pierwotnymi cechami stanu  $F_j(\Theta)$ . Dla określenia stanu trzeba więc znać wektor symptomów  $S_m(\Theta)$  oraz przyporządkowanie między symptomami a cechami stanu.

Powyższe przyporządkowanie może być jawne, np. w postaci funkcyjnej określanej metodami regresji lub niejawne, znane z przykładowego zbioru trenującego maszyn zdalnych.

Powiązanie przyczynowo-skutkowe między symptomem a cechą stanu lub czasem eksploatacji, mimo że zawsze istnieje i jest podstawą diagnostyki, nie

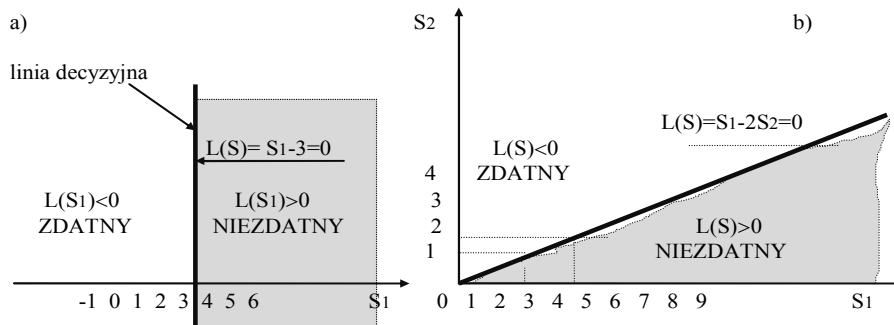
zawsze jest znane w sensie analitycznym. W diagnostyce obiektów z wielowymiarową przestrzenią uszkodzeń nie zawsze znane jest przyporządkowanie: symptom  $\rightarrow$  uszkodzenie, symptom  $\rightarrow$  stan lub symptom  $\rightarrow$  czas życia. Wiadomo jedynie, że dla danego stanu wektor symptomów  $S$  może mieć składowe o określonej wartości, lecz nie jest jasne, dlaczego takie (nieznane przyporządkowanie względem cech stanu) i kiedy to nastąpi (nieznane przyporządkowanie względem czasu).

Każdy obiekt opisany jest więc wektorem  $S$  w  $n$ -wymiarowej przestrzeni symptomów, tworząc punkt lub obraz w tej przestrzeni. Rozpoznanie stanu  $X$  traktuje się jako rozpoznanie symptomowego obrazu stanu i prowadzone jest w oparciu o znany obraz trenujący stanu zdatności obiektu  $S_p$ , według relacji:

$$\begin{aligned} S_p \equiv S_z &\rightarrow \text{stan zdatny} \\ S_p \equiv S_n &\rightarrow \text{stan niezdatny} \end{aligned} \quad (2)$$

Metody rozpoznawania obrazów generalnie można podzielić na dwie grupy: odległościowe oraz oparte na hiperpowierzchni rozdzielającej stan zdatności od stanu niezdatności. Metody odległościowe wykorzystują funkcje przynależności rozpoznawanego obrazu od zbioru trenującego, budowane na różnych miarach odległości (Euklidesa, Haminga i inne). Druga grupa metod polega na podziale przestrzeni symptomów na podprzestrzeń stanu zdatnego i niezdatnego za pomocą hiperpowierzchni decyzyjnej  $L(S) = 0$ , co ma szczególne zastosowanie przy dwuklasowym podziale stanu.

Ilustrację działania hiperpowierzchni podczas rozpoznawania przypadków z symptomem jednowymiarowym i dwuwymiarowym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozpoznawanie symptomowego obrazu stanu w przypadku jednowymiarowym (a) i dwuwymiarowym (b) [9]

Fig. 2. Recognition symptoms snapshot if one-dimensional (a) and two-dimensional (b) [9]

Wyznaczenie linii decyzji w przypadku jednowymiarowym jest równoznaczne z wyznaczeniem wartości granicznej dla symptomu  $S_1$ . W przypadku dwuwymiarowym korzysta się z bardziej skomplikowanych metod, np. metody najbliższego sąsiada czy też metody hiperstref. Prawidłowy kształt funkcji de-

czyjnej jest określany na zbiorze kilkudziesięciu obiektów, traktowanych jako zbiór trenujący.

Przy wysokim poziomie zakłóceń końcowa decyzja o stanie obiektu może być podjęta jedynie w kategoriach prawdopodobieństw stanu zdatnego lub niezdatnego. W kategoriach gęstości prawdopodobieństw diagnostyczny model probabilistyczny dla jednego symptomu można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} p(S/z) &- \text{gęstość prawdopodobieństwa zdatności dla symptomu } S \\ p(S/n) &- \text{gęstość prawdopodobieństwa niezdatności dla symptomu } S \end{aligned} \quad (3)$$

Określając te wartości dla konkretnego symptomu  $S$  można otrzymać:

$$P(S/z) = \int_{-\infty}^S p(S_k/z) dS_k; \quad P(S/n) = \int_{-\infty}^S p(S_k/n) dS_k \quad (4)$$

z oczywistym warunkiem na prawdopodobieństwo całkowite wystąpienia symptomu  $S$ :

$$\begin{aligned} P(S) &= p(S/z)p(z) + p(S/n)p(n) \\ p(z) + p(n) &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Powyższy model dla jednego symptomu jest słuszny także dla wektora symptomów  $[S]$ , przy rozumieniu całki jako wielowymiarowej.

Mając więc informacje wstępne o  $P(X)$  i określając  $P(S/X)$  z pomiaru wartości symptomu  $S$ , można obliczyć prawdopodobieństwa warunkowe zdatności  $P(S/z)$  oraz niezdatności  $P(S/n)$ . Jeśli tak obliczone prawdopodobieństwa przekraczają próg rozpoznania –  $P(X/S) > P(X)$ , dla  $X = [z, n]$ , to wartość  $S$  określa stan o największym prawdopodobieństwie:

$$P(z/S) \geq P(n/S), \quad P(z/S) \leq P(n/S) \quad (6)$$

lub dla którego poniższy iloraz:

$$\frac{P(z/S)}{P(n/S)} \geq 1 \quad (7)$$

jest większy od jedności.  $S$  może tu być pojedynczym symptomem lub wektorem symptomów  $[S]$ , co daje się przybliżyć zależnością:

$$P([S]/X) = \prod_{j=1}^n P(S_j/X) \quad (8)$$

Zatem, w metodzie Bayesa tak zbudowane kryterium pozwala na wyznaczenie stanu o maksymalnym prawdopodobieństwie po przekroczeniu progu rozpoznania.

Jeśli wektor symptomów jest zróżnicowany informacyjnie, to wnioskowanie przy wykorzystaniu ich wszystkich jest niecelowe. Analiza sekwencyjna Walda pozwala w takim przypadku określić iloraz zdarzeń przeciwnych (zdatny/niezdatny), a jako kryterium stosuje się iloczyn takich wyrażen obliczany dla kolejnych składowych wektora S o malejącej istotności informacyjnej:

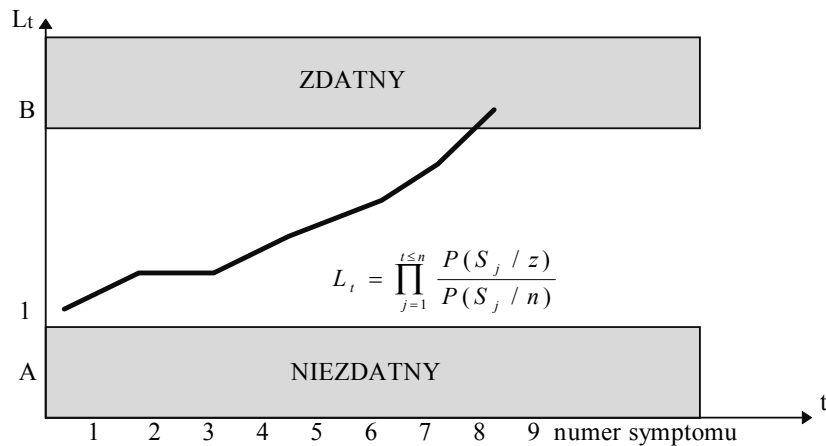
$$L_t = \prod_{j=1}^{t \leq n} \frac{P(S_j / z)}{P(S_j / n)} \quad (9)$$

Reguła decyzyjna metody sekwencyjnej (Walda) jest zatem zgodna z rysunkiem 3 i można ją zapisać następująco:

$$\begin{aligned} L_t > B, \text{ to } [S] \in [Sz] &\rightarrow \text{stan ZDATNY} \\ L_t < A, \text{ to } [S] \in [Sn] &\rightarrow \text{stan NIEZDATNY} \end{aligned} \quad (10)$$

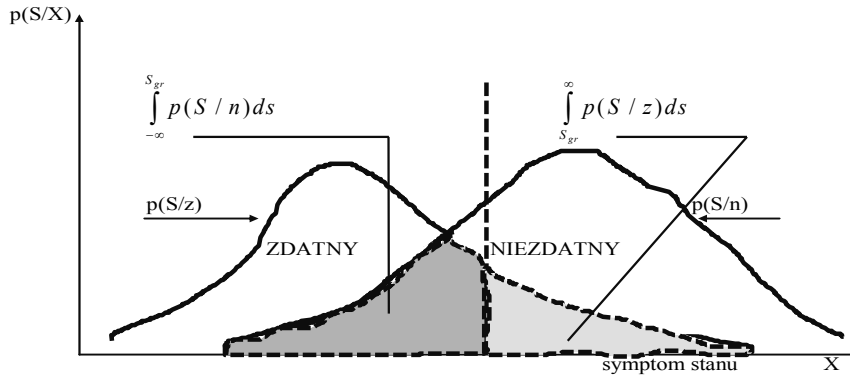
$B < L_t < A \Rightarrow$  uwzględnić kolejną składową wektora S

Probabilistyczny model diagnostyczny dopuszcza też sposób wnioskowania za pomocą wartości granicznej symptomu Sgr wyznaczonej metodami decyzji statystycznej, po zdefiniowaniu łącznego ryzyka decyzji diagnostycznej. Diagnoza jako decyzja statystyczna została przedstawiona na przykładzie jednego symptomu na rysunku 4.



Rys. 3. Sekwencyjna metoda wnioskowania diagnostycznego i granice A, B dla ilorazu wiarygodności  $L_t$

Fig. 3. Sequential diagnostic inference method and the limits of A, B for the likelihood ratio  $L_t$



Rys. 4. Wyznaczanie wartości granicznej za pomocą teorii decyzji statystycznych [8]  
 Fig. 4. Determination of the limit using statistical decision theory [8]

Dla tej składowej model probabilistyczny w postaci gęstości prawdopodobieństw symptomu w stanie zdatności  $p(S/z)$  oraz niezdatności  $p(S/n)$  pozwala, zgodnie z rysunkiem, wyznaczyć:

– prawdopodobieństwo trafnej oceny stanu zdatności:

$$P(z) \cdot \int_{-\infty}^{S_{gr}} p(S/z) ds = P(z)P(S \langle S_{gr} / z) \quad (11)$$

– prawdopodobieństwo fałszywego alarmu lub zbędnej naprawy wynikające z błędnej oceny stanu zdatności:

$$P(z) \cdot \int_{S_{gr}}^{\infty} p(S/z) dS = P(z)P(S \langle S_{gr} / z) \quad (12)$$

– prawdopodobieństwo nie wykrycia stanu niezdatności (awarii):

$$P(n) \cdot \int_{-\infty}^{S_{gr}} p(S/n) dS = P(n)P(S \langle S_{gr} / n) \quad (13)$$

– prawdopodobieństwo trafnej oceny niezdatności (awarii):

$$P(n) \cdot \int_{S_{gr}}^{\infty} p(S/n) dS = P(n)P(S \rangle S_{gr} / n) \quad (14)$$

Jeśli każdemu zdarzeniu przyporządkuje się odpowiednie koszty uogólnione  $C_{ij}$  w postaci kar za fałszywą ocenę stanu i nagrody za trafną ocenę stanu zdatności „z” i niezdatności „n”, można już sformułować globalną ocenę ryzyka  $R$  decyzji diagnostycznej.



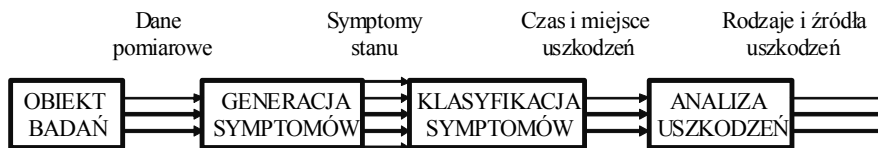
Istnieje co najmniej kilka sposobów na wyznaczenie minimalnego ryzyka, różniących się liczbą czynników w ocenie, a także stopniem znajomości apriorycznych prawdopodobieństw  $P(z)$  i  $P(n)$ . W każdym jednak przypadku można zapisać jakościowy wzór na wyznaczenie  $S_{gr}$  w postaci:

$$S_{gr} = S(R=R_{min}) \quad (15)$$

Po wyznaczeniu wartości granicznej  $S_{gr}$  jedną z tych technik obliczeniowych (przykład taki pokazano w następnym punkcie) można dokonać oceny stanu obiektu na podstawie zmierzonego symptomu za pomocą prostej reguły:

$$\begin{aligned} S < S_{gr} \text{ to } X = z &\rightarrow \text{stan ZDATNY} \\ S \geq S_{gr} \text{ to } X = n &\rightarrow \text{stan NIEZDATNY} \end{aligned} \quad (16)$$

Rozwój nowych technik inżynierii wiedzy umożliwia wykorzystanie w diagnostyce do wnioskowania diagnostycznego sieci neuronowych, systemów ekspertowych oraz logiki rozmytej, podstawowych metod sztucznej inteligencji [3, 6, 8,]. Atrakcyjność wymienionych metod w diagnostyce technicznej określa możliwość ich stosowania bez wiedzy o modelu matematycznym diagnozowanego obiektu. Zadania diagnostyczne możliwe do rozwiązania tymi sposobami przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat zadań układu diagnostyki dla sztucznej inteligencji  
Fig. 5. Diagram of diagnostic tasks for artificial intelligence

Obejmują one:

- detekcję uszkodzeń; określenie momentu pojawienia się uszkodzeń, które prowadzą do stanu niezdatności,
- lokalizację lub klasyfikację występujących uszkodzeń,
- analizę uszkodzeń; określenie rodzaju uszkodzenia, jego wielkości (intensywności) oraz źródła (przyczyn).

## LITERATURA

- [1] CEMPEL C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Wyd. P.P. Poznań 1985.
- [2] CEMPEL C., TOMASZEWSKI F.: Diagnostyka maszyn. MCNEMT, Radom 1992.
- [3] KORBICZ J.: Sztuczne sieci neuronowe. AOW, Warszawa 1994.
- [4] MICHALSKI R.: Diagnostyka uszkodzeń maszyn roboczych. ITE, Radom 2004.
- [5] NIZIŃSKI S., MICHALSKI R.: Diagnostyka obiektów technicznych. ITE, Radom 2002.
- [6] ŻÓLTOWSKI B., CEMPEL C. (red.): Inżynieria diagnostyki maszyn. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
- [7] ŻÓLTOWSKI B.: Badania dynamiki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2002.

- [8] ŻÓŁTOWSKI B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.
- [9] ŻÓŁTOWSKI B.: Podstawy diagnozowania maszyn. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2000.

### QUALIFICATION OF VEHICLES TASK

**Summary:** The instrument itself has gained increasing recognition in shaping the quality of systems is technical diagnostics, its methods and devices for tracking changes imperfecting the systems and the efficient use of machinery. To determine the scope of application of technical diagnostics, it is advisable to analyze the entire period of existence of any object and its suitability for the performance of established tasks, selection of the situations in which consideration of diagnostic measures are necessary.

**Key words:** reliability, suitability of the vehicle, operating diagnostics

Pracę zrealizowano w ramach projektu „Techniki wirtualne w badaniach stanu, zagrożeń bezpieczeństwa i środowiska eksploatowanych maszyn”.  
Numer projektu: WND-P OIG.01.03.01-00-212/0