

STEFAN ZIEMBA  
SEKCJA PODSTAW EKSPLOATACJI MASZYN KEM PAN  
WARSZAWA

JACEK M. CZAPLICKI  
INSTYTUT MECHANIZACJI GÓRNICtwo  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
GLIWICE

WYBRANE ELEMENTY DIAGNOSTYKI OBIEKTÓW TECHNI-  
CZNYCH: DIAGNOSTYKA A TEORIA INFORMACJI

W pracy zaprezentowano wybrane elementy diagnostyki technicznej poprzez rozważenie takich zagadnień, jak: określenie, przedmiot i cel diagnostyki; systemy diagnozy, diagnostyka a teoria informacji.

### 1. Wprowadzenie

Diagnostyką techniczną nazywa się dziedzinę nauki, której przedmiotem rozważań jest ocena stanu obiektów technicznych poprzez badanie ich własności i procesów towarzyszących eksploatacji tych obiektów. Uzyskana ocena stanowi podstawę do podejmowania decyzji odnośnie dalszego postępowania z obiektem. Może to być decyzja o jego użytkowaniu, obsłudze, czy też wprowadzeniu zmian w konstrukcji bądź technologii wytwarzania.

Decyzja o obsłudze ma na celu przeciwstawienie się procesowi dezorganizacji, jakiemu podlega każdy obiekt w procesie eksploatacji, natomiast zmiany w konstrukcji bądź technologii wytwarzania mają na celu na ogół zmniejszenie wrażliwości obiektu na oddziaływanie zewnętrznych jak i wewnętrznych czynników wymuszających.

Ze względu na przedmiot i cel rozważań diagnostykę można podzielić na:

- diagnostowanie,
- genezowanie,
- prognozowanie.

Diagnostowanie jest jednostkowym, ciągłym bądź dykretnym badaniem stanu obiektu, przy czym przedmiotem zainteresowania badacza jest stan obecny, w jakim znajduje się obiekt.

Genezowanie jest określaniem stanów, które zaistniały w przeszłości. Prognozowanie jest wnioskowaniem o stanach obiektu, które zaistnieją w przyszłości.

Diagnostyka techniczna ma dwa zasadnicze aspekty:

- praktyczny: badanie konkretnych obiektów,
- teoretyczny: konstrukcja, analiza i synteza modeli matematycznych i logicznych dla potrzeb badania i wnioskowania o obiektach rzeczywistych.

Pierwszy aspekt związany jest z:

- identyfikacją prawidłowości funkcjonowania obiektu, poznaniem elementów strukturalnych i ustaleniem relacji między nimi,
- określeniem repertuaru stanów technicznych obiektu,
- analizą możliwości badania objawów charakteryzujących stan obiektu,
- zbieraniem i przetwarzaniem materiału informacyjnego,
- analizą kosztów diagnostyki.

Z drugim aspektem wiąże się:

- opracowanie metod i sposobów konstrukcji struktur, testów diagnostycznych,
- budowa optymalnych programów diagnozowania,
- opracowanie aparatu matematycznego analizy i syntezy informacji uzyskiwanych z badań.

W procesie diagnozy biorą udział dwa systemy:

- obiekt diagnostyczny /obiekt diagnozy/,
- środki diagnozy /zestaw aparatury, personel,.../.

Wzajemne oddziaływanie i współdziałanie tych systemów sprawia, że tworzą one jedną całość - system diagnostyczny. Przebiegający w systemie diagnostycznym proces diagnozy, w ogólnym przypadku, polega na poddawaniu oddziaływań, pomiarze odpowiedzi i analizie ich wyników. Oddziaływania na obiekt pochodzą bądź od systemu środków diagnozy, bądź z zewnątrz - z otoczenia systemu diagnostycznego. Oddziaływania te są na ogół ujęte odpowiednim algorytmem roboczym funkcjonowania obiektu. Należy wyróżnić dwa zasadnicze rodzaje systemów diagnozy:

- system eksperymentalnej /testowej/ diagnozy,
- system funkcjonalnej diagnozy.

System eksperymentalnej diagnozy charakteryzuje się tym, że istnieje możliwość podawania na obiekt /wejście systemu/ specjalnie dobranych oddziaływań systemu środków diagnozy. Systemy eksperymentalnej diagnozy służą do badania stanu zdatności, kontroli gotowości, poszukiwania miejsc uszkodzeń i pracują wtedy, gdy obiekt nie funkcjonuje /nie wykonuje swego właściwego zadania/, bądź też są stosowane w trakcie normalnego funkcjonowania obiektu pod warunkiem, że nie zakłócają tego funkcjonowania.

W systemie funkcjonalnej diagnozy środki diagnozy nie wywierają na obiekt żadnych specjalnych oddziaływań, lecz działają jedynie oddziaływaniami robocze, przewidziane roboczym algorytmem funkcjonowania obiektu. Systemy te stosuje się z reguły dla oceny prawidłowości funkcjonowania obiektu, poszukiwania przyczyn niezdatności lub zakłóceń normalnych funkcjonowania

obiekty.

Proces diagnozy można rozpatrywać jako specyficzny rodzaj procesu sterowania, którego celem jest wyznaczanie stanu technicznego obiektu.

Podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej jest organizacja efektywnych procesów diagnozy technicznego stanu złożonych obiektów. Jednym z zasadniczych czynników, wpływających na efektywność diagnozy, jest jakość algorytmu diagnozy jak i jakość środków diagnozy. Z kolei na jakość algorytmu diagnozy istotny wpływ ma model obiektu diagnozy, a w szczególności jego struktura diagnostyczna.

Diagnostyka techniczna, mająca za sobą, jako samodzielna dziedzina nauki, kilkudziesięcioletnią przeszłość, zgromadziła i zsyntetyzowała najpierw istniejący dorobek innych nauk, w zakresie których przedmiotem rozważań było badanie stanu różnych obiektów technicznych, następnie sięgnęła do różnych dyscyplin naukowych, adoptując dla swoich potrzeb wiele modeli i metod już wypracowanych na gruncie tych nauk - wreszcie rozpoczęła wypracowywanie własnych, właściwych sobie modeli, metod i sposobów, opracowanie aparatury pojęciowej, klasyfikację problemów praktycznych i teoretycznych itp.

Przykładem udanej adopcji metod innej dyscypliny naukowej dla potrzeb diagnostyki jest wykorzystanie dorobku teorii informacji, teorii predykcji czy metod analizy drzewa zdarzeń dla potrzeb konstrukcji diagnozy obiektów.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie wybranych elementów diagnostyki technicznej poprzez rozważenie takich zagadnień, jak: diagnostyka a teoria informacji, diagnostyka a teoria predykcji oraz metody rozwiązywania zadań diagnostycznych.

Wydaje się, iż ze względu na obszar zachodzenia na siebie zakresów pojęć: niezawodności, trwałości i diagnostyki technicznej celowe jest rozważenie powyższej problematyki dla lepszego zrozumienia istoty własności obiektów technicznych do spełniania stawianych przed nimi wymagań.

## 2. Diagnostyka a teoria informacji

Wszystkie istotne cechy diagnozowanych obiektów uzewnętrzniają się w procesie wzajemnych, energetycznych oddziaływań. Funkcjonowanie obiektu można zatem przedstawić jako proces kodowania informacji o stanie jego elementów. Informacje te są przekazywane w postaci sygnałów diagnostycznych.

Diagnozowanie może więc traktować jako logiczny proces otrzymywania i przetwarzania informacji. Zagadnienia diagnostyki obejmują zatem problemy formowania, przekazywania i odbioru informacji. W tym zakresie diagnostyka wykorzystuje opracowane już metody teorii informacji.

Obiekt w procesie eksploatacji może znajdować się w różnych, nieznanych stanach fizycznych, określonych na zbiorze liczb naturalnych  $\mathbb{N}$  bądź rzeczywistych  $\mathbb{R}$ . Jednym z podstawowych zadań diagnostyki jest zmniejszenie tej nieokreśloności i ustalenie aktualnego stanu obiektu.

Stopień nieokreśloności obiektu uzależniony jest od liczby możliwych stanów i prawdopodobieństw wystąpienia tych stanów, w przypadku stanów

dyskretnych, bądź od funkcji gęstości prawdopodobieństw stanów i przedziału ich określoności - w przypadku stanów ciągłych. Wygodną miarą nieokreśloności jest pewna funkcja prawdopodobieństw stanów, zwana entropią. Jest to miara nieokreśloności a priori wyniku doświadczenia związanego z tym stanem.

Jeżeli stany obiektu zdefiniujemy w sposób dyskretny, to entropią nazywamy sumę iloczynów prawdopodobieństw wystąpienia stanów i logarytmu tych prawdopodobieństw:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_a p_i \quad (1)$$

gdzie:  $p_i$  - prawdopodobieństwo wystąpienia stanu  $i$ ,  
 $n$  - liczba stanów obiektu.<sup>1</sup>

Z powyższej definicji wynika podstawowa własność entropii dla stanów dyskretnych, a mianowicie:  $H(X) \geq 0$ , przy czym:

$$(H(X) = 0) \Leftrightarrow \left( \sum_{i=1}^n p_i = 1 \right); i \in \mathbb{N}, \quad (2)$$

gdzie:  $w_i$  -  $i$ -ty stan obiektu.

Powyższa relacja zachodzi. np. wtedy, gdy obiekt znajduje się w stanie nieodwracalnym.

Jeżeli obiekt skonstruowany jest z  $k$  elementów, z których każdy może znaleźć się w  $n_k$  stanach;  $n_k \in \mathbb{N}$ , to entropią nazywamy wyrażenie

$$H(X_1, \dots, X_k) = - \sum_{i=1}^{n_1} \dots \sum_{j=1}^{n_k} p_{i \dots j} \log_a p_{i \dots j} \quad (3)$$

gdzie:  $p_{i \dots j}$  - prawdopodobieństwo wystąpienia  $i$ -tego stanu w pierwszym elemencie, ...,  $j$ -tego stanu w  $k$ -tym elemencie.

Jeżeli stany należą do zbioru continuum, wówczas entropię definiuje się jako:

$$H(X) = - \int_X f(x) \log_a f(x) dx; x \in X \quad (4)$$

gdzie:  $f(x)$  - funkcja gęstości stanów.

Korzystając z pojęcia wartości przeciętnej wygodnie jest często rozumieć entropię jako:

$$H(X) = E \left\{ - \log_a f(x) \right\} \quad (5)$$

Zauważmy, że entropia obiektu, o stanach którego nic nie wiemy /wówczas zakłada się rozkład równomierny w przedziale określoności  $X = [c, b]$  /, jest równa:

$$H(X) = \log_a (b-c) \quad (6)$$

<sup>1</sup> Zwykle przyjmuje się  $a=2$ , a jednostki informacji nazywa się w tym przypadku bitami.

Rozważmy ponadto:

- jeżeli  $f(x) = N(m, \sigma^2)$ , to:

$$H(X) = \frac{1}{2} \log_a (2\pi e \sigma^2), \quad (7)$$

- jeżeli  $f(x) = \frac{1}{m} \exp(-\frac{x}{m})$ , to:

$$H(X) = \log_a (m e). \quad (8)$$

Warto odnotować fakt, iż w przykładach tu zaprezentowanych dla rozkładu równomiernego jak i normalnego entropia może przyjmować zarówno wartości dodatnie jak i ujemne. Ponadto z podanych przykładów wynika, że entropia może być równa zeru dla rozkładów nietrwałych, np} dla rozkładu równomiernego, gdy  $b - a = 1$  lub dla rozkładu wykładniczego, gdy  $m = e^{-1}$ .

Jeżeli obiekt skonstruowany jest z  $k$  elementów, z których każdy znajduje się w jakimś stanie continuum, to entropią nazywamy wyrażenie: (9)

$$H(x_1, \dots, x_k) = - \int_{x_1} \dots \int_{x_k} f(x_1, \dots, x_k) \log_a f(x_1, \dots, x_k) dx_1 \dots dx_k$$

Diagnostyka bazuje na tezie, że diagnostyczne parametry i ich kombinacje adekwatnie charakteryzują określone stany obiektu.

Istnieją zatem dwa zależne zbiory:

- zbiór  $W$  stanów obiektu,
- zbiór  $S$  diagnostycznych parametrów tych stanów.

W procesie diagnozowania poprzez pomiar wartości parametrów  $S$  określa się stany  $W$ . Jeśli zostanie wykonane sprawdzenie któregośkolwiek z parametrów  $s_j$ , to nieokreśloność zbioru  $W$  zmniejszy się i wyniesie  $H(W|S)$ , zgodnie z definicją:

$$H(W|S) = - \sum_{i=1}^n p_i(w|s) \log_a p_i(w|s) \text{ dla } w_i \in \mathcal{W} \quad (10)$$

$$H(W|S) = - \sum_W f(w|s) \log_a f(w|s) \text{ dla } w_i \in \mathcal{W}$$

Wielkość ta jest entropią względną, której wartość jest mniejsza od wartości  $H(W)$ , ponieważ uzyskano pewną ilość informacji o zbiorze  $W$  w rezultacie sprawdzenia parametru  $s_j$ . Entropia warunkowa zależy od wartości przyjmowanych przez parametr  $s_j$ , wobec czego jest zmienną losową.

Często operuje się pojęciem średniej entropii warunkowej. Jest to wielkość zdefiniowana jako: (11)

$$H_S(W) = E\{H(W|S)\} = \int_S H(W|S) f(s) ds = - \int_W \int_S f(w,s) \log_a f(w,s) dw ds$$

Oczywiście, analogiczne pojęcia mają miejsce również dla stanów typu dyskretnego. Dla obu rodzajów stanów prawdziwe są związki:

$$\begin{aligned} H(W,S) &= H(W) + H_W(S) \\ H(W,S) &= H(S) + H_S(W) \\ H(W,S) &\leq H(W) + H(S) \end{aligned} \quad (12)$$

przy czym równość zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy  $W$  i  $S$  są niezależne.

Ilością uzyskanej informacji  $I(W,S)$  o ziorze  $W$ , poprzez pomiar wartości parametrów ze zbioru  $S$  określa różnica entropii:

$$I(W,S) = H(W) - H(W|S) \quad (13)$$

Jeżeli zamiast  $H(W|S)$  wstawimy  $H_S(W)$ , wówczas:

$$I(W,S) = H(W) + H(S) - H(W,S) \quad (14)$$

Podstawiając do powyższego wzoru odpowiednie wyrażenia, otrzymujemy:

$$I(W,S) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P\{W=w_i, S=s_j\} \log_a \frac{P\{W=w_i, S=s_j\}}{P\{W=w_i\}P\{S=s_j\}} & \text{dla typu} \\ & \text{skokowego} \\ \int_W \int_S f(w,s) \log_a \frac{f(w,s)}{f_1(w)f_2(s)} dw ds & \text{dla typu ciągłego} \end{cases} \quad (15)$$

Oczywiście, zbiory mogą być typu mieszanego i dość często zdarza się, że  $w_i \in \mathcal{N}$ , natomiast  $s \in \mathcal{X}$ .

A oto podstawowe własności ilości informacji.

1.  $I(W,S) \geq 0$ , przy czym równość zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy  $W$  i  $S$  są niezależne.
2.  $I(W,S) = I(S,W)$ .
3. Jeżeli  $Z = g(W)$  † gdzie:  $g$  - pewna funkcja, to  $I(W,S) = I(Z,S)$ .

W procesie diagnozowania bardzo istotne znaczenie mają informacje częściowe, uzyskiwane za pomocą parametrów  $s_j$ . Ponieważ nie wszystkie parametry niosą odpowiednią ilość informacji o stanie obiektu, dlatego jednym z głównych zadań diagnostyki jest wytypowanie odpowiedniego zbioru  $S$ , który będzie zbiorem najbardziej informacyjno-nośnych parametrów  $s_j$ .

Dotychczasowe rozważania dotyczące entropii i ilości informacji były pozbawione wymiaru czasu. Łatwo zauważyć, że wprowadzenie dodatkowego wymiaru, jakim jest czas, zmieni uzyskane wyniki w sposób zasadniczy. Przede wszystkim bezpośrednio przeniesienie pojęcia entropii stanu, jako zmiennej losowej czy wektora losowego, prowadzi do jednowymiarowej, dwuwymiarowej i ogólnie,  $n$  - wymiarowej entropii procesu stochastycznego - stanu trwającego w czasie. I tak, np. jednowymiarową entropią stanów ciągłych  $X(t)$  nazywa się wielkość:

$$H_X^{(1)}(t) = - \int_X f_t(x) \log_a f_t(x) dx \quad (16)$$

gdzie:  $f_t(x)$  - jednowymiarowa funkcja gęstości stanów  $X(t)$ .

Zauważmy jednakże, iż nawet entropia wielowymiarowa stanów jest w istocie jedynie entropią wielowymiarowej zmiennej losowej i nie stanowi pełnej charakterystyki nieokreśloności stanów. W związku z tym wprowadza się bardziej efektywne - adekwatne określenie entropii stanów, korzystając z faktu, że szeroką klasę stanów można przedstawić jako granicę ciągu pewnych stanów pomocniczych /teoretycznych/, które z kolei wyrażają się przez ciąg zmiennych losowych. Zmienne te mogą być np. współczynnikami w rozwinięciu ortogonalnym lub rozwinięciu według wzoru Taylora. Wtedy definiuje się entropię stanów pomocniczych jako entropię związanego z nimi ciągu zmiennych losowych, a entropię stanu określa się za pomocą odpowiedniego przejścia granicznego. Powstaje oczywiście kwestia praktycznej identyfikacji tak sformułowanego rozwiązania problemu. Uzyskiwane rezultaty w tym względzie dalekie są na ogół od szerokiej praktyki diagnostycznej.

Ilość informacji, jaką o danym stanie  $w_j(t)$  dostarcza parametr  $s_1(t)$ , można określić w sposób powyżej opisany. Korzysta się wtedy również z przedstawienia danych parametrów w postaci parametrów pomocniczych i definiuje się ilość informacji jaką o stanie  $w_j(t)$  dostarcza parametr  $s_1(t)$  jako ilość informacji zawartej w ciągu "próbek"  $j$ -tego stanu o ciągu "próbek"  $l$ -tego parametru. Wprowadza się przy tym pojęcie ilości informacji przypadającej na jednostkę czasu.

W przypadku całkowicie dowolnych stanów i parametrów trudno jest otrzymać dla entropii i ilości informacji jawne wyrażenia analityczne. Ograniczając się jednak do pewnych szczególnych klas stanów i parametrów, które jak się okazuje mają dość znaczne zastosowanie, można otrzymać konkretne wzory.

I tak, np. jeżeli stan  $w_j(t)$  i parametr  $s_1(t)$  są stacjonarne, stacjonarnie związane i gausowskie, to wykazuje się, że ilość informacji przypadająca na jednostkę czasu, jaką o stanie  $w_j(t)$  dostarcza parametr  $s_1(t)$ , wyraża się wzorem:

$$I\{w_j(t), s_1(t)\} = - \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \log_a \left[ 1 - \frac{|g_{j1}(\omega)|^2}{g_j(\omega) g_1(\omega)} \right] d\omega \quad (17)$$

gdzie:  $g_j(\omega)$  i  $g_1(\omega)$  są gęstościami widmowymi odpowiednio stanu,  $w_j(t)$  i  $s_1(t)$ , a  $g_{j1}(\omega)$  jest wzajemną gęstością widmową.

Szersze omówienie tej problematyki znaleźć można w bogatej monografii Gelfanda i Jagłoma [4], Kullbacka [6], czy pracy [5], w których powyższe zagadnienia omówione są od strony matematycznej.

Z określenia ilości informacji i z jej własności wynika, że za podstawę pomiaru ilości informacji przyjmuje się tylko probabilistyczne charaktery-

styki zdarzeń. Pomija się emocjonalną treść informacji, jej wartość dla tego kto ją otrzymuje, możliwe następstwa spowodowane daną informacją itp. Takie podejście do określenia ilościowej miary informacji jest jednak obiektywne.

W przypadkach gdy ze względu na rodzaj zagadnienia należy uwzględnić takie czynniki, jak jej cenność czy możliwe następstwa, omawiana teoria nie może być stosowana. Warto jednakże zauważyć, że czynione są próby rozszerzenia zastosowań teorii informacji, np. w drodze wprowadzenia pewnych obiektywnych wskaźników cenności informacji [10].

#### LITERATURA

- [1] Będkowski L., Rozwadowski T.: Rola diagnostyki technicznej w procesie eksploatacji urządzeń. ZEM, z.1, 13, 1973.
- [2] Diagnostyka niezawodnościowa systemów technicznych. Mat. Szkoły Zimowej 78, OPT Katowice, 1978.
- [3] Diagnostyka urządzeń mechanicznych. Mat. I Szkoły Diagnostyki Technicznej, Biały Bór 9-16.10.1977.
- [4] Gelfand J.M., Jagłom A.M.: O wycisleniu koliczestwa informacji o słuczajnoj funkcji sobierzajuszcziejstia w drugiej takoj ze funkcji. Usp. mat. nauk, 12, 1, 73, 1957.
- [5] Huang R.Y., Johnson R.A.: Information transmission with timecontinucus random processes. IEE Trans. on Inform. Theory, IT - 9,2, 1963.
- [6] Kullback S.: Information Theory and Statistics. New York 1958.
- [7] Leśniewski J., Pelc H.: Modele diagnostyczne urządzeń. Problemy i modele eksploatacji urządzeń. Mat. Szkoły Zimowej 74, OPT, Katowice 1974.
- [8] Odnowianie. Mat. IV KSEUT t. 4, OPT, Katowice 1977.
- [9] Pelc H.: Klasyfikacja stanów urządzenia oraz modele procesów diagnostycznych. Problemy i modele eksploatacji urządzeń. Mat. Szkoły Zimowej 74, OPT, Katowice 1974.
- [10] Szaniawski K.: Informacja a decyzja. Zag. Naukoznawstwa, 4, 13, 1968.
- [11] Ziemia S.: Rola diagnostyki technicznej. [3].

#### ИЗБРАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

#### ДИАГНОСТИКА И ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ.

#### Резюме

В статье представлены избранные элементы технической диагностики, рассматривая также проблемы как: определение, предмет и задачи диагностики, системы диагноза диагностика и теория информации.



SOME SELECTED ISSUES OF DIAGNOSTICS  
OF TECHNICAL OBJECTS: DIAGNOSTICS AND INFORMATION  
THEORY

S u m m a r y

The paper deals with the selected elements of technical diagnostics when considering the problems of definition, subject and purpose of diagnostics, of its systems and one referring to diagnostics and information theory interrelation.