

DIAGNOZOWANIE NA PODSTAWIE NIEPEWNYCH SYNDROMÓW STANU OBIEKTU

Lesław BĘDKOWSKI, Tadeusz DĄBROWSKI

Institut Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki
 Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
 fax (22) 683-91-25, e-mail: lbedkowski@wel.wat.edu.pl, tdabrowski@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule rozważa się zagadnienie wiarygodności diagnoz formułowanych w oparciu o niepewne – z powodu występujących zakłóceń procesu diagnozowania – syndromy stanu. Proponuje się metodę diagnozowania umożliwiającą otrzymywanie dostatecznie wiarygodnych diagnoz poprzez wielokrotne powtarzanie testowania i komparację uzyskanych syndromów.

Słowa kluczowe: diagnozowanie, wiarygodność diagnozy, niepewność syndromu.

DIAGNOSING BASED ON UNCERTAIN SYNDROMES OF AN OBJECT STATE

Summary

A question of authenticity of diagnosis formulated on the base of uncertain – for the reason of disturbances – syndromes of an object state is discussed. Diagnosing method, which allows receiving the sufficiently authentic diagnoses through multiple repetition of testing and comparison of obtained syndromes, is proposed.

Key words: diagnosing, authenticity of diagnosis, uncertainty of syndrome.

1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Rozpatrzmy na wstępie algorytm procedury diagnozowania odpowiedni dla rozważanego problemu (Rys. 1).

Zazwyczaj przyjmuje się, że diagnoza jest prawdziwa wtedy, gdy oparta jest na prawdziwym syndromie.

Syndrom jest prawdziwy wtedy, gdy zawiera symptomy prawdziwe, tzn. charakterystyczne dla rzeczywistego stanu obiektu diagnozowanego.

W praktyce eksploatacyjnej nierzadko występuje fałszowanie symptomów a w konsekwencji fałszowanie syndromów i diagnoz. Powodować to mogą różne czynniki, między innymi:

- losowe zakłócenia sygnałów w obwodach elektrycznych;
- losowe zakłócenia widma akustycznego;
- niepewności pomiarowe;
- błędy operacji wnioskowania itp.

W związku z tym, że procedura diagnozowania nie jest w pełni wiarygodna to diagnosta powinien mieć ograniczone zaufanie do tego, że otrzymana diagnoza jest prawdziwa.

Diagnozę można przedstawić ogólnie w postaci zbioru par:

$$D = \langle \text{STAN} \leftrightarrow \text{PRAWDOPODOBIEŃSTWO STANU} \rangle \quad (1)$$

Jest to tzw. diagnoza zupełna:

Stan	\mathcal{E}_0	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	...	\mathcal{E}_N
Prawdopod. stanu	$P(\mathcal{E}_0)$	$P(\mathcal{E}_1)$	$P(\mathcal{E}_2)$...	$P(\mathcal{E}_N)$

gdzie:

\mathcal{E}_0 – stan zdatności obiektu;

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_N$ – stany niezdatności obiektu;

$P(\mathcal{E}_0), P(\mathcal{E}_1), P(\mathcal{E}_2), \dots, P(\mathcal{E}_N)$ – prawdopodobieństwa stanów.

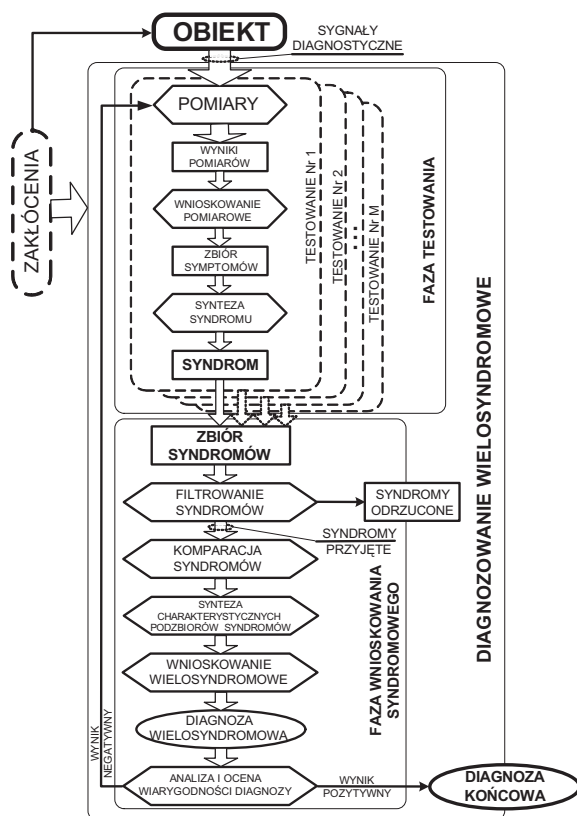
W praktyce rzadko można uważać, że prawdopodobieństwo jednego z możliwych stanów jest równe jeden, tzn. że ten stan jest absolutnie pewny. Na ogół występuje niepewność wyrażająca się w tym, że co najwyżej jednemu ze stanów można przypisać prawdopodobieństwo bliskie jedności a pozostałym stanom prawdopodobieństwa bliskie zeru. W warunkach niepewności symptomów przy formułowaniu diagnozy należy analizować rozkład prawdopodobieństw stanów i na tej podstawie formułować diagnozę.

Najczęściej – w praktyce – używa się **skróconej postaci diagnozy**, podając jedynie stan najbardziej prawdopodobny czyli taki, że:

$$E_i^* : P(E_i^*) = \max_{i=0,1,2,\dots,N} P(E_i) \quad (2)$$

Powinien być jednak spełniony **co najmniej** jeszcze jeden warunek:

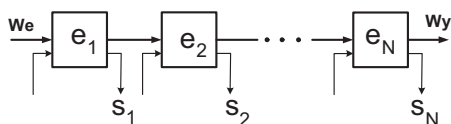
$$P(E_i^*) \geq P_{gr} \quad (3)$$



Rys. 1. Ogólny algorytm procedury diagnozowania w przypadku niepewnych syndromów

Jeśli warunek (3) nie jest spełniony lub diagnosta z innych powodów nie ma zaufania do wnioskowanej w ten sposób diagnozy to zazwyczaj powtarza testowanie. Powtarzanie się takiego samego syndromu ma potwierdzać wiarygodność diagnozy opartej na syndromie występującym w największej liczbie testowań. Powtarzanie testowań i uzyskiwanie zbioru syndromów jest równoznaczne z uzyskiwaniem **nadmiaru informacyjnego**.

Wydłuża to – rzecz jasna – wymagany czas diagnozowania, zatem uzyskanie nadmiaru informacyjnego wymaga dysponowania **nadmiarem czasowym**. Należy jednak wziąć pod uwagę, że współczesne procedury diagnostyczne wykorzystują szybkie systemy informatyczne (komputerowe), co znacznie zmniejsza wymagania dotyczące nadmiaru czasowego.



Rys. 2. Przykładowa struktura obiektu diagnozowanego

Oznaczenia: e_1, e_2, \dots, e_N – elementy obiektu diagnozowania; s_1, s_2, \dots, s_N – wyniki pomiarów (sprawdzeń), które w najprostszym przypadku stanowią zarazem symptomy stanu elementów

Postawmy pytanie:

„Czy i w jaki sposób przez powtarzanie testowania można uzyskać dostatecznie wiarygodną diagnozę – mimo pojawiania się fałszywych symptomów, a w konsekwencji fałszywych syndromów?”

Zagadnienie to rozpatrzmy na przykładzie prostego obiektu o niezawodnościowej i funkcjonalnej strukturze szeregowej, zawierającej N elementów (Rys. 2).

Przyjmijmy następujące założenia:

1. Wszystkie elementy obiektu mogą być zdadne lub co najwyżej jeden element może być niezdatny.
2. Obiekt jest zdalny jeśli wszystkie elementy są zdadne, a jest niezdatny jeśli jeden element jest niezdatny; zatem obiekt może znajdować się w jednym z $N + 1$ stanów:

$$E = \{E_0, E_1, E_2, \dots, E_N\}$$

3. Stany elementów są wzajemnie niezależne.
4. Stan obiektu jest stabilny tzn. nie zmienia się w trakcie testowania oraz w trakcie ewentualnego powtarzania testowania tzn. zbiór jednakowych syndromów dotyczy tego samego stanu.
5. W procedurze diagnozowania (testowania) sprawdzane są wszystkie elementy, sygnał diagnostyczny każdego elementu mierzony jest indywidualnie (Rys.2).

6. Wynik pomiaru i -tego determinuje symptom s_i stanu elementu e_i ($i = 1, 2, \dots, N$); w rozpatrywanym przypadku symptom jest jednowymiarowy (oparty jest na jednym wyniku pomiaru), tor symptomu jest jednoelementowy (tzn. symptom zależy od stanu tylko jednego elementu), tory różnych symptomów są rozłączne.

7. Symptom może przyjmować logiczną wartość 0 lub 1 ; symptom negatywny 0 jest symptomem charakterystycznym stanu niezdatności elementu, symptom pozytywny 1 jest symptomem charakterystycznym stanu zdadności elementu.

8. Zbiór N symptomów stanowi syndrom stanu obiektu; zatem rozróżnia się $N+1$ charakterystycznych syndromów stanu obiektu; przykład zbioru stanów oraz odpowiadających im charakterystycznych syndromów i symptomów dla przypadku $N = 8$ pokazuje tabela 1.

9. Każdy syndrom jest wnioskowany z odpowiadających mu symptomów. Każdy fałszywy symptom determinuje fałszywość syndromu, a w konsekwencji fałszywą diagnozę.

10. Syndrom zawierający więcej niż jeden symptom negatywny uznaje się za fałszywy i odrzuca (filtracja wstępna) – zgodnie z założeniem (1).

11. Wyniki komparacji syndromów są pewne.

12. Znane są a priori prawdopodobieństwa uzyskania prawdziwego wyniku każdego pomiaru, a więc: znane są prawdopodobieństwa $R_{z1+}, R_{z2+}, \dots, R_{zN+}$ uzyskania prawdziwych symptomów pozytywnych oraz

prawdopodobieństwa $R_{z1-}, R_{z2-}, \dots, R_{zN-}$ uzyskania prawdziwych symptomów negatywnych.

13. Dla uproszczenia przyjmijmy, że wartość prawdopodobieństwa otrzymania prawdziwego symptomu negatywnego oraz wartość prawdopodobieństwa otrzymania prawdziwego symptomu pozytywnego są takie same:

$$\begin{aligned} R_{z1+} &= R_{z1-} = R_{z1} \\ R_{z2+} &= R_{z2-} = R_{z2} \\ &\dots\dots\dots \\ R_{zN+} &= R_{zN-} = R_{zN} \end{aligned} \quad (4)$$

14. Znane są prawdopodobieństwa zdadności a priori R_1, R_2, \dots, R_N każdego elementu obiektu.

Tabela 1. Przyporządkowanie syndromów stanom niezdatności

Rzeczywisty stan obiektu	Stan zdat. obiektu	Stany niezdatności obiektu							
	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
Syndrom charakt.	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
S_1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
S_2	1	1	0	1	1	1	1	1	1
S_3	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S_4	1	1	1	1	0	1	1	1	1
S_5	1	1	1	1	1	0	1	1	1
S_6	1	1	1	1	1	1	0	1	1
S_7	1	1	1	1	1	1	1	0	1
S_8	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Relacja: syndrom \Rightarrow diagnoza	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow	\Downarrow
Wnioskowana diagnoza	$D(E_0)$	$D(E_1)$	$D(E_2)$	$D(E_3)$	$D(E_4)$	$D(E_5)$	$D(E_6)$	$D(E_7)$	$D(E_8)$

Diagnostowanie w warunkach niepewności przebiega według algorytmu przedstawionego na rys.1. Wiadomo, że podstawą każdej diagnozy są robocze lub diagnostyczne sygnały generowane przez obiekt i zawierające informację o stanie obiektu. Wartości tych sygnałów muszą być przetworzone do postaci diagnozy.

Pierwszą operacją jest pomiar sygnałów diagnostycznych oraz zarejestrowanie ich wyników np. w postaci zbioru liczb:

$$X = \langle x_1, x_2, \dots, x_N \rangle \quad (5)$$

Drugą operacją jest przetworzenie tych wyników na symptomy stanu na podstawie zastosowanej relacji np. w postaci:

$$\begin{aligned} [x_{id} \leq x_i \leq x_{ig}] &\Rightarrow [s_i = 1] \\ [(x_i < x_{id}) \vee (x_i > x_{ig})] &\Rightarrow [s_i = 0] \end{aligned} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

gdzie: x_{id} , x_{ig} – wartości graniczne przedziału dopuszczalnych wartości sygnału diagnostycznego dla stanu \mathcal{E}_i .

Trzecią operacją jest synteza syndromu na podstawie zbioru otrzymanych symptomów.

Te trzy operacje (jako fragment procedury diagnostycznej) zazwyczaj nazywa się **testowaniem**.

Powstaje pytanie:

„Czy w oparciu o otrzymany jeden syndrom można próbować wnioskować diagnozę jednosyndromową?”

Zauważmy, że wyniki pomiarów, wnioskowanie pomiarowe oraz wnioskowanie symptomowe mogą być niepewne. Zatem jednorazowe testowanie i utworzony syndrom może być niepewny, a zatem **jednosyndromowa diagnoza może być niepewna**.

W takim przypadku należy zastosować testowanie wielokrotne, a **syntezę diagnozy oprócz na wnioskowaniu wielosyndromowym**.

2. MODEL DIAGNOZOWANIA PRZY NIEPEWNYCH SYNDROMACH

Zgodnie z przyjętymi założeniami obiekt znajduje się w jednym ze stanów należących do zbioru:

$$E = \{E_0, E_1, \dots, E_N\} \quad (7)$$

Zgodnie z tabelą 1 tym stanom odpowiadają charakterystyczne syndromy tworzące zbiór:

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_N\} \quad (8)$$

Można wyznaczyć:

– prawdopodobieństwo a priori stanu zdadności \mathcal{E}_0 obiektu:

$$P(E_0) = \prod_{i=1}^N R_i \quad (9)$$

– prawdopodobieństwa a priori poszczególnych stanów niezdatności \mathcal{E}_j :

$$P(E_j) = (1 - R_j) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N R_i \quad (10)$$

$j = 1, 2, \dots, N$

Zgodnie z założeniem (2) obiekt znajduje się w jednym ze stanów należących do zbioru (7), zatem można wyznaczyć warunkowe prawdopodobieństwa tych stanów:

$$P_j = P(E_j|A) = \frac{P(E_j)}{\sum_{i=0}^N P(E_i)} \quad (11)$$

$j = 0, 1, 2, \dots, N$

gdzie: A – warunek, polegający na tym, że stan obiektu \mathcal{E}_j należy do zbioru \mathcal{E} .

Dla sformułowania diagnozy zupełnej należy zrealizować algorytm diagnostyczny, pokazany na rys.1. W tym celu trzeba wstępnie ustalić liczbę testowań M oraz wykonać kolejne operacje wymienione poniżej.

1. Wybrać dostępne sygnały diagnostyczne.

2. Zrealizować sesję testową. Wynikiem tej sesji jest zbiór syndromów S o licznosci L_S (z każdego testowania otrzymuje się jeden syndrom).

3. Przeprowadzić wzajemną **komparację** otrzymanych syndromów i utworzyć następujące podzbiory charakterystycznych syndromów:

– podzbiór S_{00} syndromów zawierających więcej niż jeden symptom negatywny (np.: 1, 0, 0, 1, ..., 1), czyli podzbiór syndromów

negatywny symptom s_k zostanie odczytany fałszywie jako symptom pozytywny oraz, że pozytywny symptom s_j zostanie odczytany fałszywie jako symptom negatywny oraz, że wszystkie pozostałe symptomy pozytywne zostaną L_j -krotnie odczytane bezbłędnie (nie zostaną zakłócone);

$$j = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, N$$

7. Wyznaczyć względne prawdopodobieństwa a' posteriori stanów obiektu (na mocy poczynionych założeń zaistnienie zdarzenia Z_j jest równoznaczne z zaistnieniem stanu \mathcal{E}_j):

$$P(\mathcal{E}_j|L) = P(Z_j|L) = \frac{P(Z_j)}{\sum_{i=0}^N P(Z_i)} \quad (13)$$

gdzie: $j = 0, 1, 2, \dots, N$;

L – zbiór podzbiorów uznanych (przyjętych) syndromów.

3. PRZYKŁAD

W celu zilustrowania efektywności diagnozowania opartego na komparacji zakłóconych syndromów przeprowadzono symulacyjny eksperyment.

Do badań przyjęto obiekt pokazany na rys. 2 i spełniający założenia 1÷14. Możliwe stany tego obiektu, symptomy i syndromy definiuje tabela 1.

W eksperymencie ustalono następujące warunki:

– wartości prawdopodobieństw a' priori zdadności elementów obiektu są jednakowe i wynoszą: $R_1 = R_2 = \dots = R_8 = 0,9$;

– wartości prawdopodobieństw prawdziwości (bezbłędności) symptomów są jednakowe i wynoszą: $R_{z1} = R_{z2} = \dots = R_{z8} = 0,85$;

– wartość prawdopodobieństwa prawdziwości syndromu: $R_S = 0,2725$;

– wartość prawdopodobieństwa warunkująca uznanie syndromu stanu za prawdziwy gdy wskazuje na stan zdadności: $P(\mathcal{E}_0)_{gr} = 0,995$;

– wartość prawdopodobieństwa warunkująca uznanie syndromu stanu za prawdziwy gdy wskazuje na stan niezdatności: $P(\mathcal{E}_1)_{gr} = 0,95$;

$$i = 1, 2, \dots, 8;$$

– obiekt wprowadzono w stan niezdatności \mathcal{E}_4 (niezdatny element e_4).

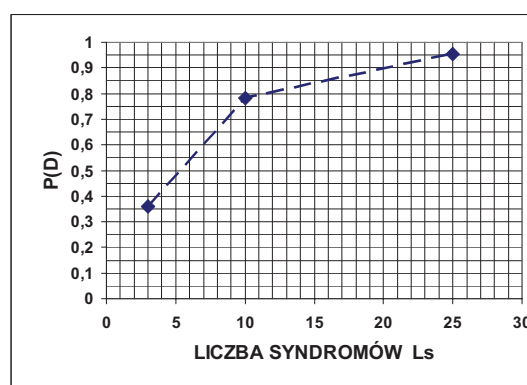
W rezultacie symulacji jednej sesji diagnostycznej uzyskano następujące wyniki (rys. 3):

– po wykonaniu 3-ch testowań (zbiór syndromów o liczności 3) diagnoza skrócona (2) wskazuje błędnie na stan zdadności z prawdopodobieństwem: $P(\mathcal{E}_0) = 0,8067$; oznacza to, że nie jest spełniony warunek (3) – zatem należy zwiększyć licznosc zbioru syndromów stanowiących podstawę wnioskowanej diagnozy;

– po wykonaniu dalszych 7-miu testowań (czyli po zwiększeniu zbioru syndromów do 10) diagnoza

skrócona (2) wskazuje poprawnie na stan niezdatności nr 4 z prawdopodobieństwem: $P(\mathcal{E}_4) = 0,7810$; oznacza to, że nadal nie jest spełniony warunek (3) – zatem należy jeszcze zwiększyć licznosc zbioru syndromów stanowiących podstawę wnioskowanej diagnozy;

– po zwiększeniu liczby testowań (a tym samym i liczby syndromów) do 25 diagnoza skrócona (2) wskazuje poprawnie na stan niezdatności nr 4 z prawdopodobieństwem: $P(\mathcal{E}_4) = 0,99999$; oznacza to, że warunek (3) jest spełniony i nie ma podstaw do kwestionowania prawdziwości diagnozy.



Rys. 3. Prawdopodobieństwo prawdziwości diagnozy w funkcji liczby syndromów

Można jeszcze zapytać jak wygląda statystyka wyników badania prawdziwości diagnoz uzyskanych w rezultacie przeprowadzenia wielu sesji diagnostycznych.

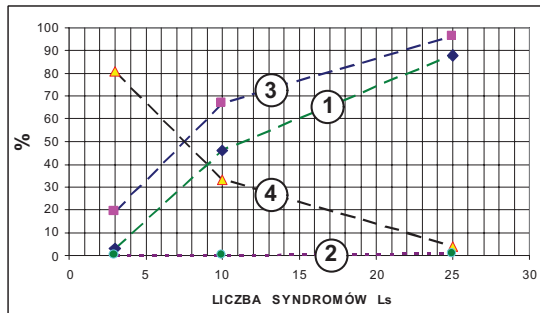
W odpowiedzi na to pytanie wykonano symulację 100 sesji po 3 testowania w każdej sesji, 100 sesji po 10 testowań oraz 100 sesji po 25 testowań w każdej sesji. Dla każdego 100 sesji wyznaczono procentowy udział diagnoz prawdziwych (na podstawie porównania z zadany stanem \mathcal{E}_4).

Uzyskane wyniki zawiera tabela 2.

Tabela 2. Wyniki symulacji

L. zreal. sesji	L. testowań w sesji	L. diag. prawdz. spełniających w-k (3) (%)	L. diag. fałsz. spełniających w-k (3) (%)	L. diag. prawdz. spełniających w-k (2) (%)	L. diag. fałsz. spełniających w-k (2) (%)
100	3	3	0	19	80
100	10	46	0	67	33
100	25	86	1	96	4

Wyniki te ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Liczba diagnoz (wyrażona w %) w funkcji liczby syndromów w sesji diagnostycznej

Oznaczenia: 1 – liczba diagnoz prawdziwych spełniających warunek (3); 2 – liczba diagnoz fałszywych spełniających warunek (3); 3 – liczba diagnoz prawdziwych spełniających warunek (2); 4 – liczba diagnoz fałszywych spełniających warunek (2)

Zwróćmy uwagę na to, że wprowadzenie zaniedbanie warunku (3) zwiększa pozornie skuteczność diagnozowania (większe są liczby diagnoz prawdziwych) lecz równocześnie pozwala na przyjmowanie diagnoz fałszywych. Może to być niebezpieczne, szczególnie wtedy gdy fałszywa diagnoza wskazuje stan zdadności.

Przestrzeganie warunku (3) zapewnia znikomą liczbę błędów dzięki temu, że diagnozy niepewne zostają odrzucone.

Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność stosowania komparacji syndromów i formułowania diagnozy w oparciu o dostatecznie liczny zbiór syndromów.

4. PODSUMOWANIE

1. Zauważmy, że w przypadku gdy wartości prawdopodobieństw zafałszowania symptomów zdużą do zera to diagnozowanie niepewne zduża do diagnozowania pewnego. **Zatem diagnozowanie niepewne można uważać za uogólnioną formę diagnozowania.**

2. Przedstawiono tu model sytuacji diagnostycznej dla obiektu o szeregowej strukturze niezawodnościowej i funkcjonalnej. Opisana metoda postępowania może być również wykorzystana przy diagnozowaniu obiektów o innej strukturze, przy czym wymaga to zastosowania odpowiedniego modelu matematycznego.

3. Przytoczony przykład ilustrujący diagnozowanie w warunkach niepewności potwierdza praktyczne walory zaproponowanej procedury diagnozowania i zastosowanego modelu diagnostycznego.

LITERATURA

- [1] Będkowski L.: *Elementy diagnostyki technicznej*. WAT, wyd. 2, Warszawa 1992.
- [2] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Modele komparatywnego wyboru diagnozy*. XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”. Węgierska Górka, 6.03÷11.03.2006, Wyd. Politechniki Śląskiej, ss. 7÷14.
- [3] Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wpływ komparacyjnego diagnozowania efektu na niezawodność systemu*. Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 9÷14.01 2006, ss.10.
- [4] Grabski F., Jaźwiński J.: *Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*. WKŁ, Warszawa 2001.



Prof. dr hab. inż. Lesław BĘDKOWSKI jest profesorem zwyczajnym na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Swoje zainteresowania naukowe skupia głównie wokół następujących problemów: teoria diagnostyki technicznej, optymalizacja procedur diagnostycznych, diagnostyka systemów antropotechnicznych, diagnostyka w ujęciu potencjałowo-efektowym, teoria użytkowania w ujęciu wieloprotocowym z wykorzystaniem informacji diagnostycznej, wielopoziomowe systemy dozoru i terapeutyczne, diagnostyka bezpieczeństwa.



Dr hab. inż. Tadeusz DĄBROWSKI jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego i pełni funkcję dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe koncentruje głównie w obszarze teorii eksploatacji – zwłaszcza na diagnostyce technicznej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmował i/lub zajmuje należą: diagnostyka systemów antropotechnicznych; optymalizacja procesów diagnostyczno-obsługowych; komputerowe wspomaganie procesu diagnostyczno-obsługowego.