

Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny

mgr inż. Bernatowicz Dariusz

**Zastosowanie czterowartościowej oceny stanów
w procesie diagnozowania cech eksploatacyjnych
złożonych obiektów technicznych**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
dr hab. inż. Stanisław Duer

Abstract

The doctoral dissertation describes the application of four-valued state assessment in the process of diagnosing the operational features of complex technical objects. The aim of this type of diagnosis is to identify the state immediately preceding the occurrence of an inoperable state (failure) and to locate the element that generates this state.

Due to a progressive increase in complexity and tasks performed, the commonly used three-valued logic does not completely solve the problems of modern technical objects. Provision the user with fast and reliable information on the technical condition of objects is achieved by introducing multi-valued diagnostics with a greater number of recognised states ($k > 3$).

The principles and rules of diagnosis presented here and their practical verification made it possible to obtain, in the process of inference, a significant increase in the diagnostic information of the four-valued assessment (4VL) in comparison with the three- and two-valued assessment (3VL, 2VL).

In the theoretical part, the ranges of changes in the values of features and their limits for individual states of a technical object in four-valued logic were determined. The scheme of classes and directions of changes in object states were defined including the criteria of the principles of the recognition of particular states in the process of classification. In order to evaluate the state of an object, evaluation indices were distinguished in the form of a quantitative measure of the acquisition of diagnostic information, an additional information gain function and the efficiency of technical maintenance.

In the practical part, a computer system for diagnosing complex technical objects was designed and implemented, one which carries out the process of inference in two-, three- and four-valued state evaluations. A complete diagnostic process was implemented in the system, consisting of such activities as: modelling the object, a functional and technical analysis of the object tested, measurements and analyses of signal characteristics and inference of the object state. Additionally, two test stands were created for the diagnosis of the control system of a spark-ignition petrol engine of the "Motronic" type and a low-power solar power plant.

The method presented in the paper, including the results of the experiments, unequivocally confirms the proposition contained the thesis, and it demonstrates that it is possible to diagnose complex technical objects using a four-value state evaluation.

Streszczenie

W rozprawie doktorskiej opisano zastosowanie czterowartościowej oceny stanu w procesie diagnozowania cech eksploatacyjnych złożonych obiektów technicznych. Celem tego typu diagnozy jest rozpoznanie stanu bezpośrednio poprzedzającego wystąpienie stanu niezdatności oraz zlokalizowanie elementu generującego taki stan.

Ze względu na postępujący wzrost złożoności i wykonywanych zadań powszechnie stosowana logika trójwartościowa nie rozwiązuje w pełni problemów współczesnych obiektów technicznych. Zapewnienie użytkownikowi szybkiej i rzetelnej informacji o stanie technicznym obiektów uzyskuje się poprzez wprowadzenie wielowartościowej diagnostyki z większą liczbą rozpoznanych stanów ($k > 3$). Przedstawione zasady i reguły diagnozy oraz ich praktyczna weryfikacja umożliwiły uzyskanie w procesie wnioskowania istotnego wzrostu informacji diagnostycznej oceny czterowartościowej w stosunku do oceny dwu i trójwartościowej..

W części teoretycznej wyznaczono zakresy zmian wartości cech i ich granic dla poszczególnych stanów obiektu technicznego w logice czterowartościowej. Określono schemat klas i kierunki zmian stanów obiektu oraz kryteria zasad rozpoznawania poszczególnych stanów w procesie klasyfikacji. W celu oceny stanu obiektu wyróżniono wskaźniki oceny w postaci ilościowej miary pozyskiwania informacji diagnostycznej, funkcji zysku informacji dodatkowej oraz efektywności obsługi technicznej.

W części praktycznej zaprojektowano i wdrożono komputerowy system diagnostyki złożonych obiektów technicznych, który realizuje proces wnioskowania w dwu, trzy i czterowartościowych ocenach stanu. W systemie zaimplementowano pełny proces diagnostyczny, na który składają się takie czynności jak: modelowanie obiektu, analiza funkcjonalna i techniczna badanego obiektu, pomiar i analiza charakterystyk sygnału oraz wnioskowanie o stanie obiektu. Dodatkowo stworzono dwa stanowiska pomiarowe do diagnostyki układu sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym typu „Motronic” oraz elektrowni słonecznej małej mocy.

Przedstawiona w pracy metoda wraz z wynikami eksperymentów jednoznacznie potwierdza tezę rozprawy, udowadniając, że możliwe jest diagnozowanie złożonych obiektów technicznych za pomocą czterowartościowej oceny stanu.

Wykaz skrótów i oznaczeń

$A(t)$	- współczynnik rodzaju niezdatności
α	- próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian nieistotnych wartości funkcji wyjściowej
β	- próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian istotnych wartości funkcji wyjściowej
DIAG 2	- Autorski komputerowy system diagnostyczny obiektów technicznych z wykorzystaniem dwu, trzy i czterowartościowej oceny stanów
$\varepsilon = \{\varepsilon_n\}$	- zbiór możliwych stanów obiektu
$\varepsilon(e_j) = 0$	- stan niezdatności elementu e_j
$\varepsilon(e_j) = 1$	- stan niezdatności krytycznej elementu e_j
$\varepsilon(e_j) = 2$	- stan niezdatności elementu e_j
$\varepsilon(e_j) = 3$	- stan zdatności elementu e_j
d_j	- j-te sprawdzenie
$D(\varepsilon(e_{i,j}))$	- wynik sprawdzenia (porównania) sygnału diagnostycznego z wzorcowym dla j-tego elementu podstawowego w i-tym zespole funkcjonalnym obiektu
E_{pot}	- efektywność profilaktycznego obsługiwanie technicznego
E_i	- i-ty zespół funkcjonalny obiektu
$e_{i,j}$	- j-ty element w i-tym zespole funkcjonalnym
γ	- próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian krytycznych wartości funkcji wyjściowej
F_c	- współczynnik jakości użytkowania obiektu
$F_c(t)$	- funkcja jakości użytkowanego obiektu
$F(\Delta X_i)_G$	- graniczna wartość dystrybuanty unormowanego wektora metryki odległości cechy sygnału
$F(\Delta X_{(n)i})$	- wartość dystrybuanty unormowanej metryki odległości wektora sygnału od jego wzorca
$I_k(A)$	- ilość możliwej do uzyskania informacji (wystąpienie zdarzenia A) dla zbioru k równoprawnych stanów w procesie diagnozowania
O	- struktura wewnętrzno-funkcjonalna obiektu
p_n	- n-ty parametr charakteryzujący stan obiektu
$\rho_{i,j}$	- współczynnik niezgodności podobieństwa wektorów cech badanego

	sygnału i wektora wzorcowego
$R_{d1} - R_{d4}$	- reguły dekompozycji struktury funkcjonalno-diagnostycznej obiektu na cztery poziomy diagnostyczne
$R_{w1} - R_{w4}$	- reguły wnioskowania dla czterowartościowej oceny stanu obiektu
$R_{wd1} - R_{wd4}$	- reguły wnioskowania diagnostycznego wyznaczającego stan elementów obiektu w czterowartościowej ocenie stanu
$\omega(e_{i,j})$	- cecha eksploatacyjna j-tego elementu w i-tym zespole funkcjonalnym w aktualnym czasie użytkowania obiektu
$\omega_{i,j}$	- współczynnik niezgodności podobieństwa wektorów cech badanego sygnału i wektora wzorcowego
$W(\varepsilon(O))$	- wartość stanu obiektu
$W(\varepsilon(E_i))$	- wartość stanu i-tego zespołu funkcjonalnego w obiekcie
$W(\varepsilon(e_{i,j}))$	- wartość stanu j-tego elementu w i-tym zespole funkcjonalnym
$W_n(\varepsilon(e_{i,j}))$	- n-wartościowa reprezentacja stanu j-tego elementu w i-tym zespole funkcjonalnym
X_i	- sygnał diagnostyczny podawany na wejście i-tego elementu funkcjonalnego
$[X(e_{i,j})]$	- wektor rzeczywistego sygnału diagnostycznego
$[X_w(e_{i,j})]$	- wektor wzorcowego (nominalnego) sygnału diagnostycznego
$[\Delta X_{(n)i}]$	- unormowany wektor metryki odległości j-tego sygnału
$[\Delta X_{i,j}]$	- wektor różnicowej metryki sygnału diagnostycznego
Y_i	- i-ty wyjściowy sygnał diagnostyczny
\forall	- kwantyfikator ogólny
\exists	- kwantyfikator szczegółowy
\Rightarrow	- implikacja
\Leftrightarrow	- równoważność
\emptyset	- zbiór pusty (dopełnienie macierzy sygnałów)

Spis treści

1	Przedmiot, cel i teza naukowa rozprawy	8
1.1	Wprowadzenie.....	8
1.2	Analiza stanu wiedzy w zakresie diagnozowania obiektów technicznych	10
1.3	Wnioski wynikające z analizy literatury	15
1.4	Cel i teza pracy	15
1.4.1	Cel naukowy.....	16
1.4.2	Cel praktyczny.....	16
1.4.3	Hipoteza pracy.....	17
1.5	Zakres pracy	17
2	Czterowartościowa ocena stanu obiektu technicznego	19
2.1	Interpretacja stanu	19
2.2	Klasy stanów w ocenie czterowartościowej.....	24
2.2.1	Stan zdatności.....	25
2.2.2	Stan niepełnej zdatności	25
2.2.3	Stan krytycznej zdatności.....	25
2.2.4	Stan niezdatności.....	26
2.3	Przedziały i kierunki zmian stanów obiektu technicznego	26
2.4	Schemat klasyfikacji stanów w logice 2-4 wartościowej.....	29
2.5	Model zmiany stanu w procesie użytkowania	30
2.6	Czterowartościowa ocena stanów w aspekcie informacyjnym	32
2.6.1	Miara ilości uzyskanej informacji diagnostycznej	33
2.6.2	Funkcja przyrostu dodatkowej informacji diagnostycznej.....	33
2.6.3	Efektywność profilaktycznego obsługiwanian technicznego	34
2.7	Podsumowanie	35
3	Diagnozowanie obiektów technicznych w cztero-wartościowej ocenie stanu.....	37
3.1	Charakterystyka procesu diagnozowania	37
3.2	Model funkcjonalno-diagnostyczny i jego dekompozycja	38
3.3	Wyznaczanie zbioru informacji diagnostycznej	42
3.4	Zastosowanie drzewa decyzyjnego w torze sprawdzeń diagnostycznych	44
3.5	Klasyfikacja stanów obiektu w procesie wnioskowania	47
3.5.1	Model procesu wnioskowania w czterowartościowej ocenie stanu	47
3.5.2	Wyznaczanie stanu elementów podstawowych obiektu	48
3.5.3	Wyznaczanie stanu obiektu i zespołów funkcjonalnych.....	53
3.6	Podsumowanie	54
4	Komputerowy system diagnostyczny DIAG 2.....	56
4.1	Model systemu diagnostycznego	56
4.1.1	Obiekt	57
4.1.2	Karta pomiarowa	57
4.1.3	Program diagnostyczny	58
4.1.4	Pomiarowa i diagnostyczna baza wiedzy	58
4.2	System akwizycji danych i analiza sygnałów pomiarowych	59
4.3	Komputerowy program diagnostyczny DIAG 2	62
4.3.1	Specyfikacja	62
4.3.2	Wymagania, ograniczenia i uruchomienie programu	63
4.3.3	Struktura projektu.....	65
4.4	Podstawy opracowania diagnostycznego w programie DIAG 2.....	68
4.4.1	Block Diagram Panel	69

4.4.2	Input Data Panel	70
4.4.3	Signals Panel	71
4.4.4	Classification Panel	72
4.4.5	Prezentacja wyników procesu klasyfikacji	73
4.5	Podsumowanie	75
5	Diagnozowanie systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic	76
5.1	Wprowadzenie.....	76
5.1.1	Stanowisko badawczo-laboratoryjne.....	78
5.1.2	Przetwarzanie informacji w urządzeniu sterującym.....	79
5.2	Opracowanie diagnostyczne systemu sterowania pracą silnika o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1	81
5.2.1	Schemat funkcjonalno-diagnostyczny.....	82
5.2.2	Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych	83
5.2.3	Dane pomiarowe symulacji	85
5.2.4	Struktura wewnętrzna i zbiór sygnałów diagnostycznych	86
5.3	Wnioskowanie stanów obiektu	88
5.4	Ocena stanu diagnostycznego systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1	90
5.5	Podsumowanie	93
6	Diagnozowanie urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy	95
6.1	Stanowisko badawczo-laboratoryjne	95
6.2	Opracowanie diagnostyczne urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy ..	97
6.2.1	Schemat funkcjonalno-diagnostyczny.....	97
6.2.2	Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych	99
6.2.3	Dane pomiarowe symulacji	100
6.2.4	Struktura wewnętrzna i zbiór sygnałów diagnostycznych	101
6.3	Wnioskowanie stanu obiektu	103
6.4	Ocena stanu diagnostycznego elektrowni słonecznej małej mocy	105
6.5	Podsumowanie	108
7	Wnioski i kierunki dalszych badań.....	109
7.1	Wnioski naukowe.....	109
7.2	Wnioski uytylitarne	111
7.3	Dalsze kierunki badań	114
	Bibliografia	116
	Spis rysunków.....	127
	Spis tabel.....	129
	Spis załączników (płyta CD)	130

1 Przedmiot, cel i teza naukowa rozprawy

1.1 Wprowadzenie

Obiekty techniczne użytkowane w procesie eksploatacji tracą swoje własności cech użytkowych w wyniku oddziaływania na nie różnych czynników wewnętrznych i zewnętrznych. W większości przypadków oddziaływania te mają charakter niekorzystny i po pewnym czasie prowadzą do utraty własności użytkowych obiektu. Dlatego użytkownik obiektu technicznego w procesie jego eksploatacji powinien podejmować działania minimalizujące skutki tych niekorzystnych oddziaływań poddając obiekt procesowi odnowy [72].

Jednym z początkowych etapów realizacji procesu odnowy jest diagnostyka techniczna stanów eksploatowanego obiektu. Etap ten określa czynności związane z identyfikowaniem stanów technicznych w użytkowanym obiekcie dla zaistniałego zbioru zdarzeń lub sytuacji eksploatacyjnych. Opisywane jest więc jednoznaczny stan niezawodnościowym zachowanie się obiektu w danym momencie, określanym jako klasyfikacja (diagnoza stanów) [99].

W początkowym okresie diagnostyki technicznej w procesie klasyfikowania stanów stosowano logikę dwuwartościową, gdzie: "1" określa stan zdalny, a "0" stan niezdatny. Diagnostyka z rozpoznawaniem stanów w logice dwuwartościowej może być wystarczająca w zakresie bieżącego rozpoznawania stanów zdalnych i niezdatnych. Jednak na potrzeby organizacji procesów odnawiania badanych obiektów jest nie wystarczająca., ponieważ naturalnym postępowaniem jest dążenie do rozpoznania stanu obiektu przed jego uszkodzeniem, jakim jest stan zdalności niepełnej. Zastosowanie w takim przypadku logiki dwuwartościowej na potrzeby organizacji procesu obsługiwań stało się niewystarczające. Dlatego zaczęto w diagnostyce technicznej stosować logikę trójwartościową opracowaną przez J. Łukaszewicza [115]. Zastosowane w niej wnioskowanie diagnostyczne wyróżnia oprócz stanu zdalności "2" i niezdatności "0", stan zdalności częściowej (niepełnej zdalności) "1". Wprowadzenie dodatkowego stanu pozwoliło na zwiększenie możliwej do uzyskania informacji diagnostycznej, co w kontekście eksploatacyjnej obsługi technicznej wspomaga ten proces oraz dodatkowo zwiększa wartość przeciętnego czasu bezawaryjnej pracy obiektu. W pracy doktorskiej realizowanej w WAT przez A. Więcka [148] wykazano, że logika trójwartościowa zwiększa informacyjność diagnoz w stosunku do logiki dwuwartościowej o 1,58 trita.

Wypracowane w ten sposób diagnozy stosowane w procesie organizacji obsługi technicznego w znaczący sposób zwiększają ich efektywność, co wykazano w pracach prof. S. Duera.

Pomimo, że problematyka diagnozowania w logice trójwartościowej jest obecnie intensywnie rozwijana to opracowane zagadnienia i reguły wnioskowania diagnostycznego nie w pełni rozwiązują problemy współczesnych obiektów technicznych. Ich duża złożoność i odpowiedzialność zadań wymaga dostarczenia użytkownikowi szybkiej i wiarygodnej informacji o stanie technicznym tych obiektów. Jednym ze sposobów przeciwdziałania powyższym problemom jest wprowadzenie diagnostyki wielowartościowej z większą liczbą rozpoznawanych stanów ($k > 3$). Zastosowanie klasyfikacji wielostanowej zwiększa możliwości pozyskania nowej informacji diagnostycznej, która przyczynia się do poprawienia wiarygodności badania stanu technicznego obiektu.

Prowadzone przez autora badania pod kierunkiem prof. S. Duera nad wykorzystaniem logiki czterowartościowej w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych przyczyniły się do powstania autorskiego komputerowego systemu diagnostycznego DIAG 2 [3]. W systemie tym zaimplementowano podstawowe etapy procesu diagnostycznego wraz z mechanizmem wnioskowania w logice dwu, trzy i czterowartościowej (2-4VL). Do etapów procesu diagnostycznego rozpatrywanego w systemie możemy zaliczyć takie zagadnienia jak: modelowanie obiektu technicznego, analiza funkcjonalno-diagnostyczna obiektu, pomiary i analiza cech sygnałów diagnostycznych oraz wnioskowanie dotyczące rozpoznawania stanów obiektu technicznego.

Ponieważ w literaturze brak jest opracowań, które w sposób wyczerpujący opisują zastosowania logiki k -wartościowej (dla $k > 3$) w procesie diagnozowania obiektów technicznych to przyjęte podejście wymaga podjęcia wielu analiz techniczno-ekonomicznych oraz unifikacji zasad i reguł dla różnych klas obiektów. Rozpatrując logikę czterowartościową jako szczególny przypadek logiki wielowartościowej, skupiono się w pierwszej kolejności na opracowaniu teoretycznych zasad i reguł diagnozowania wykorzystywanych do wnioskowania w czterostanowej ocenie obiektu. Dlatego w tym celu dokonano porównania diagnoz z dwu, trój i czterowartościowym rozpoznawaniem stanów w kontekście pozyskania informacji diagnostycznej oraz profilaktycznej obsługi technicznej określającej przeciętny czas bezawaryjnej pracy obiektu.

Do realizacji praktycznego etapu zastosowania czterowartościowej oceny stanu opracowano dwa stanowiska pomiarowe. Pierwsze stanowisko zorganizowano w oparciu o system sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1. Drugie stanowisko badawcze opracowano na bazie urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy. Wybór ten wynikał głównie z dwóch przyczyn, a mianowicie: szybkiego tempa wzrostu złożoności obiektów technicznych oraz powszechnego zastosowania tej klasy urządzeń w przemyśle motoryzacyjnym oraz energetycznym.

Podstawowym celem prac badawczych prowadzonych przez autora jest przedstawienie możliwości i celowości zastosowania czterowartościowego diagnozowania. Drugim celem jest znalezienie odpowiedzi na pytanie jakie wymierne korzyści możemy uzyskać poprzez zwiększenie liczby stanów w ocenie złożonych obiektów technicznych. Dodatkowo istotne jest praktyczne wykazanie dużej skuteczności i uniwersalności komputerowych aplikacji w systemach diagnostycznych.

1.2 Analiza stanu wiedzy w zakresie diagnozowania obiektów technicznych

Analizując literaturę dotyczącą diagnostyki i wnioskowania można stwierdzić, że rozwija się ona w dwóch kierunkach. Pierwszym z nich jest diagnostyka procesów przemysłowych i procesów techniczno-technologicznych opisywanych w pracach [84, 102, 109, 110]. Natomiast drugim kierunkiem rozwoju jest diagnostyka urządzeń i obiektów technicznych [5, 6, 14, 15, 21, 119].

Badanie stanu zwane również monitorowaniem jest stałym, cyklicznie powtarzaniem formułowania diagnoz o stanie obiektu lub o jego zmianach w sposób systemowy przez automatyczny system diagnozujący [128, 129, 142]. Monitorowanie obiektu przez taki system prowadzone na bieżąco w czasie rzeczywistym nazywane jest często diagnozowaniem on-line. Ten rodzaj diagnostyki wymagający formułowania diagnoz na bieżąco rozwinął się w przypadku diagnozowania procesów technologicznych i przemysłowych [105].

Zbiór sygnałów diagnostycznych (testów) dostępnych w danej chwili monitorowania jest podzbiorem zbioru sygnałów generowanych przez wszystkie algorytmy detekcyjne. Zmiany funkcjonującej struktury obiektu (np. czasowe wyłączenia niektórych aparatów technologicznych) powodują również zmiany zbioru uszkodzeń, które powinny być rozpoznawane. Nie można zatem jednorazowo określić nierozróżnialnych bloków elementarnych lub niezmiennych reguł wnioskowania

diagnostycznego. W trakcie eksploatacji obiektu ulegają one częstym zmianom. Dlatego konieczne jest prowadzenie wszystkich operacji wnioskowania diagnostycznego na bieżąco. Wymaga to uwzględnienia zachodzących zmian zbiorów zmiennych procesowych w postaci sygnałów diagnostycznych oraz zbioru uszkodzeń [104, 108].

Diagnoza formułowana w systemach diagnostycznych w chwili t dotyczy jednak czasu wcześniejszego, co jest związane z opóźnieniami w ujawnianiu się objawów uszkodzeń w obiektach dynamicznych. Należy zauważyć, że w chwili wygenerowania (n -tej) diagnozy wystąpić mogły już kolejne uszkodzenia, których objawy nie zostały jeszcze wykryte przez realizowane testy diagnostyczne. Odtwarzany w procesie dozoru stan obiektu może nie być całkowicie zgodny ze stanem rzeczywistym. Spowodowane to jest nie tylko dynamiką obiektu diagnozowania, ale również ograniczoną rozróżnialnością stanów, niepewnością wyników testów itp. [120, 123].

Rozwój diagnostyki urządzeń i obiektów technicznych można rozpatrywać poprzez rozwój zagadnień bezpośrednio związanych z procesem diagnozowania, do których należą następujące problemy: analiza funkcjonalno-diagnostyczna obiektu, modelowanie obiektu technicznego, pomiar i analiza cech sygnałów diagnostycznych oraz wnioskowanie diagnostyczne określające rozpoznawanie stanów diagnozowanego obiektu technicznego.

Problematyka dotycząca opracowania modeli obiektów technicznych oraz metod i sposobów realizacji analizy funkcjonalno-diagnostycznej jest dobrze opracowana w literaturze. Znaczące są tutaj następujące prace [7, 8, 131, 137]. Zadaniem analizy funkcjonalno-diagnostycznej obiektu jest wyznaczenie racjonalnego i optymalnego zbioru sygnałów diagnostycznych oraz ich wzorców, które są podstawą diagnozowania danego obiektu. Zbiór tych sygnałów musi być optymalny dlatego, żeby wypracowane diagnozy o stanie obiektu diagnozowania były wiarygodne.

W następującej literaturze [34, 35, 66, 118] zaprezentowano przykłady wykonania analizy funkcjonalno-diagnostycznej obiektów różnych klas. Opisują one nowe podejście do analizy funkcjonalno-diagnostycznej obiektu na przykładzie urządzenia sterowania pracą silnika samochodowego i systemu radarowego. Natomiast w pracach [31, 46, 47, 81, 89] przedstawiono podstawy teoretyczne pozyskiwania i przekształcania informacji diagnostycznej o obiekcie. W tym celu zaprezentowano sposób podziału struktury wewnętrznej w modelu funkcjonalno-diagnostycznym obiektu. Przedstawiono także zależności matematyczne będące podstawą do wyznaczania zbioru elementów struktury wewnętrznej obiektu. Opisano schemat wyznaczania zbioru wejściowej

informacji diagnostycznej w postaci zbioru sygnałów diagnostycznych modelu obiektu obsługiwanego. Wyniki pracy poparto przykładem zestawienia zbioru informacji diagnostycznej będącej w dalszym etapie podstawą jego diagnozowania dla badanej klasy urządzenia.

Z analizy literatury [20, 125, 131-133] można przypuszczać, że dalsze prace i działania związane z doskonaleniem analizy funkcjonalno-diagnostycznej obiektów będą skierowane na automatyzację tego procesu przy zastosowaniu sztucznej inteligencji i sieci neuronowych. Równocześnie rozwijać się będzie kierunek związany z wyznaczaniem i pozyskiwaniem na potrzeby diagnostyki obiektu tylko jednego uogólnionego sygnału diagnostycznego w obiekcie, to jest takiego sygnału diagnostycznego, który będzie zawierał uogólnioną informację diagnostyczną o całym badanym obiekcie technicznym.

W zakresie rozwoju teorii i praktyki diagnostycznej, które są zamieszczone w pracach [17, 88, 110], przedstawiono różne podejścia do modelowania obiektów i systemów technicznych. W następujących pozycjach [33, 36, 126] zaprezentowano ogólne podstawy wykonywania opisu (tworzenia) modelu funkcjonalno-diagnostycznego, będącego podstawą przy wyznaczaniu modelu obiektu obsługiwanego. Opisano także zależność wyrażającą sposób selekcjonowania elementów struktury wewnętrznej obiektu, które wymagają wykonania obsługiwanego (odnawiania). Przedstawiono i omówiono schemat modelu ekspertowego systemu obsługiwanego, którego celem jest odnawianie obsługiwanego obiektu technicznego.

Pomiar i analiza cech sygnałów diagnostycznych jest nieodzownym elementem każdego typu diagnostyki technicznej procesów i obiektów technicznych. W jednej z nich dokonuje się pomiarów cech wielkości opisujących procesy techniczno-technologiczne. Natomiast w drugiej dokonuje się pomiarów i analizy cech sygnałów diagnostycznych wyróżnionych w wyniku analizy funkcjonalno-diagnostycznej. Dlatego ważnym elementem w każdym systemie diagnostycznym jest moduł pomiarowy często w literaturze nazywany węzłem diagnostyczno-pomiarowym. Moduł pomiarowy to nowoczesny zespół urządzeń przetwornikowo-pomiarowych, w którym podstawowym elementem jest oprogramowana karta pomiarowa. Dokonuje ona pomiarów wyróżnionych sygnałów diagnostycznych w obiekcie i przetwarza je do postaci wymaganej przy wykorzystaniu techniki komputerowej.

Problematyka dotycząca pomiarów sygnałów diagnostycznych jest stosunkowo obszerna i omawiana między innymi w pracach [93, 145, 146, 151]. Zawierają one

zagadnienia dotyczące działania w zakresie projektowania efektywnego toru pomiarowego oraz zastosowania w nim karty pomiarowej. Wyniki zaprezentowane w pracach [28, 37, 46]. przedstawiają opis skonstruowanego efektywnego toru pomiarowego będącego ważnym elementem w strukturze systemu diagnostycznego. rezultaty pracy poparto przykładem zestawienia pomiarowej bazy informacyjnej dla badanego urządzenia.

Z analizy literatury dotyczącej miernictwa sygnałów [18, 31, 92] na potrzeby diagnozowania obiektów technicznych, można przypuszczać, że rozwój technik pomiarowych będzie nakierowany na automatyzację tego procesu. W miernictwie stosuje coraz to bardziej nowoczesne rozwiązania wraz z zastosowaniem sztucznej inteligencji, w tym sieci neuronowych itp. [10, 96].

Końcowym etapem diagnozowania obiektów technicznych jest etap wnioskowania, w którym wypracowywane są diagnozy o stanie badanego obiektu. Problematyka dotycząca wnioskowania opisywana w literaturze [12, 91, 145] dotyczy wykorzystania różnych wartości logik oceny stanów. Tradycyjnie rozwinął się kierunek diagnostyki technicznej z wykorzystaniem logiki dwuwartościowej [1, 0]. Stosunkowo dobrze tego typu diagnozowanie jest opisywane w pracach [7, 95]. Innym rodzajem diagnostyki technicznej, który rozwinął się na bazie diagnostyki dwuwartościowej jest diagnozowanie w logice trójwartościowej [148].

Podstawy diagnozowania wielowartościowego, w tym szczególnie trójwartościowego obiektów technicznych leżą w pracach Arystotelesa, który opisywał, że pomiędzy obiektywną „prawdą” i „fałszem” jeszcze istnieje to coś, co nie jest rozpoznane bezpośrednio. Teorię tą rozwinął i dopracował (Łukasiewicz J. 1920). To właśnie J. Łukasiewicz w swych pracach stwierdził, że istnieją „pewność zdarzenia”, „pewność zdarzenia negatywnego” oraz „przedział (stan) pomiędzy nimi w postaci niepewności tych zdarzeń”. Problematyka diagnozowania w logice trójwartościowej jest przedstawiana w pracach [108, 111, 148], W tej ostatniej wykazano przewagę informacyjności diagnostyki trójwartościowej nad dwuwartościową. Stosunkowo znaczny wkład w rozwój diagnostyki trójwartościowej urządzeń technicznych mają opracowania prof. S. Duera [30, 32, 34, 61]. Prace te prezentują podstawy organizacji i projektowania systemów diagnostycznych dla wybranych urządzeń w logice trójwartościowej. Szczególnie ważnym elementem w tych pracach jest opracowanie zbioru reguł wnioskowania diagnostycznego w logice trójwartościowej, która wykorzystywana jest w projektowaniu struktury systemu obsługiwanego obiektu.

Szczególny rozwój diagnostyki trójwartościowej nastąpił z chwilą rozwinięcia się kierunku diagnostyki urządzeń technicznych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, a szczególnie sieci neuronowych [78, 97, 101, 116]. W rozwoju nowego kierunku diagnostyki z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych w procesie wnioskowania dla logiki trójwartościowej znaczący wkład i dorobek wniósł prof. S. Duer. Doskonalił on systematycznie opracowaną koncepcję inteligentnego systemu diagnostycznego, w którym na bieżąco ulepszany był algorytm oraz komputerowy program diagnostyczny. Systematycznie przedstawiane osiągnięte w wyniku badań rezultaty i wnioski przedstawiono między innymi w następujących pracach [28-32, 36, 52]. Zaprezentowano w nich strukturę komputerowego systemu diagnostycznego oraz scharakteryzowano elementy funkcjonalne tego systemu. Dodatkowo opisano podstawy diagnozowania obiektów z wykorzystaniem inteligentnego systemu diagnostycznego pracującego ze sztuczną siecią neuronową. Przedstawiono również podstawy trenowania sztucznej sieci neuronowej, co jest zagadnieniem niezwykle trudnym w praktycznej realizacji i w literaturze rzadko spotykanym.

Innym kierunkiem, który także w znaczący sposób wpłynął na rozwój diagnostyki urządzeń, a może nawet bardziej na diagnostykę procesów technologicznych, są zbiory wiedzy rozmytej, systemy ekspertowe oraz teoria algorytmów ewolucyjnych [13, 87, 125, 128]. Systemy stosujące wnioskowanie rozmyte mogą być wyposażone w bazę wiedzy generowaną automatycznie z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych. Wówczas metody wnioskowania cechują się zdolnością uczenia i adaptacji, wobec tego stanowią ewolucyjne systemy wnioskowania rozmytego. Znaczne udoskonalenie właściwości wnioskowania rozmytego powoduje zastosowanie sieci neuronowych do automatycznego tworzenia reguł lingwistycznych, co tworzy hybrydowy system neuronowo-rozmyty [113].

Diagnozowanie, czy też monitorowanie stanu obiektu technicznego może być rozpatrywane zatem jako dwa odrębne procesy bieżącego diagnozowania, z których jeden polega na badaniu stanu obiektu. Natomiast drugi występuje w przypadku rozpoznanego stanu niezdatności i związanej z tym lokalizacji zaistniałego uszkodzenia. Przywrócenie obiektu do stanu użytkowania-zdatności wymaga ingerencji człowieka, np. naprawy lub wymiany uszkodzonych elementów. Stąd zadaniem inteligentnego systemu diagnostycznego obiektu jest powiadamianie o takich zmianach stanów jego użytkownika. Rozwiązanie problemu automatycznego diagnozowania on-line jest

podstawą do opracowania inteligentnego układu regulacji własności użytkowych w obiekcie technicznym [149].

1.3 Wnioski wynikające z analizy literatury

Przeprowadzony powyżej przegląd literatury pozwolił na sformułowanie następujących wniosków:

- w literaturze dotyczącej problematyki eksploatacyjnej niewystarczająco są opracowane zagadnienia dotyczące zastosowaniu logiki czterowartościowej w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych,
- brak jest opisu pozyskiwania zależności analitycznych będących podstawą przy projektowaniu struktury systemu diagnozowania złożonych obiektów technicznych. Niedostatecznie opracowane są problemy dotyczące określania schematu klas i kierunków zmian stanów obiektu w logice czterowartościowej,
- brak jest opisu teoretycznych zasad i reguł diagnozowania z zastosowaniem procesu wnioskowania opartego na czterowartościowej ocenie stanów obiektu. Dotyczy to głównie wyznaczenia przedziałów zmian wartości cech i ich granic dla poszczególnych stanów obiektu technicznego na bazie przedziału zmian dopuszczalnych i granicznych właściwych dla logiki czterowartościowej,
- w literaturze brak jest opracowań dotyczących opisu metody określenia ilościowej miary pozyskiwania informacji diagnostycznej, funkcji przyrostu dodatkowej informacji oraz czasu bezawaryjnej pracy dla czterowartościowej oceny stanu obiektu,
- brak jest opisu możliwości wykorzystania informacji diagnostycznej wyrażonej w czterowartościowej ocenie stanów do budowania efektywnej bazy wiedzy badanego obiektu,
- pomimo ciągłego rozwoju diagnostyki urządzeń technicznych, brak jest w literaturze przykładów zastosowania czterowartościowej oceny stanów,

Sformułowanie i analiza wniosków dotyczących literatury pozwoliło w dalszej części na określeniu pytań badawczych, celów naukowych i praktycznych oraz tezy pracy.

1.4 Cel i teza pracy

Na podstawie analizy literatury wyznaczono, że zasadniczym celem pracy jest opracowanie metody diagnozowania złożonych obiektów technicznych z zastosowa-

niem czterowartościowej oceny stanów. Przedstawiony cel pracy prowadzi do postawienia następujących pytań badawczych:

- **Czy istnieje możliwość zastosowania czterowartościowej oceny stanów w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych**
- **Jaki jest wpływ zastosowania czterowartościowej oceny stanów na przyrost wyznaczonej informacji diagnostycznej w badanym obiekcie technicznym**

Bezpośrednio z pytań badawczych wynikają cele: naukowy i praktyczny.

1.4.1 Cel naukowy

- opracowanie teoretycznych zasad i reguł diagnozowania z zastosowaniem procesu wnioskowania opartego na czterowartościowej ocenie stanów obiektu,
- wyznaczenie przedziałów zmian wartości cech i ich granic dla poszczególnych stanów obiektu technicznego na bazie przedziału zmian dopuszczalnych i granicznych właściwych dla logiki czterowartościowej, Wymagane jest zachowanie odpowiednich dla oceny dwuwartościowej przedziałów zmian parametru diagnostycznego dla stanu zdatności i niezdatności.
- określenie schematu klas i kierunków zmian stanów obiektu w czterowartościowej ocenie stanów,
- zdefiniowanie kryteriów dla reguł rozpoznawania poszczególnych stanów w procesie klasyfikacji.
- wyznaczenie wielkości analitycznych pozwalających na określenie ilościowej miary pozyskiwania informacji diagnostycznej, funkcji przyrostu dodatkowej informacji oraz czasu bezawaryjnej pracy dla czterowartościowej oceny stanu obiektu

1.4.2 Cel praktyczny

- zaprojektowanie, implementacja i wdrożenie komputerowego systemu diagnostycznego złożonych obiektów technicznych realizującego proces wnioskowania w dwu-, trój- i czterowartościowej ocenie stanów,
- utworzenie dwóch stanowisk pomiarowych dotyczących diagnostyki systemu sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1

oraz urządzenia elektroenergetycznego w postaci elektrowni słonecznej małej mocy,

- opracowanie dwóch baz wiedzy diagnostycznej (BWD) na podstawie badań i pomiarów realizowanych na stanowiskach badawczych,
- realizacja procesu diagnozowania z wykorzystaniem systemu komputerowego do wypracowania diagnoz w logice dwu-, trój i czterowartościowej. Etap ten dotyczy głównie wykonania takich czynności jak: modelowanie obiektu, analizę funkcjonalno-techniczną badanego obiektu technicznego, pomiar i analizę cech sygnałów oraz wnioskowanie stanu obiektu,

1.4.3 Hipoteza pracy

Na podstawie analizy obszaru naukowego w zakresie diagnostyki przy zastosowaniu czterowartościowej oceny stanów w złożonych obiektach technicznych, a także dostępnych analiz i badań prac prowadzonych przez zespół badawczy prof. S. Duera którego członkiem jest autor, sformułowano następujące hipotezy:

Hipoteza I

Należy przypuszczać, że istnieje możliwość diagnozowania złożonych obiektów technicznych z wykorzystaniem czterowartościowej oceny stanów.

Hipoteza II

Należy sądzić, że zastosowanie czterowartościowej oceny stanów, a szczególnie stanu zdolności krytycznej „1”, zwiększy ilość uzyskanej informacji diagnostycznej w stosunku do dwu i trójwartościowej oceny stanów w obiektach technicznych.

1.5 Zakres pracy

Pracę zrealizowano w następujących etapach:

W rozdziale pierwszym przedstawiono analizę stanu wiedzy w zakresie diagnozowania obiektów technicznych, sformułowano cele i hipotezy badawcze oraz opisano strukturę pracy.

Czterowartościową ocenę stanów w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych scharakteryzowano w rozdziale drugim. Omówiono w nim podstawowe założenia dotyczące obiektu technicznego i występujących przedziałów zmian cech eksploatacyjnych. Dokonano interpretacji stanów obiektu oraz określono schemat

klasyfikacji stanów wraz z kierunkami ich zmian. Na koniec przedstawiono wybrane wskaźniki przyrostu informacji i efektywności profilaktycznego obsługiwanego w celu porównania k-wartościowej oceny stanu obiektu dla $k = \{2,3,4\}$.

Realizacja procesu diagnozowania obiektów technicznych z wykorzystaniem czterowartościowej oceny stanu przedstawiono w rozdziale trzecim. Scharakteryzowano struktury wewnętrzne modelu funkcjonalno-diagnostycznego i występujące między nimi relacje. Zdefiniowano reguły dekompozycji modelu do czterech poziomów struktury obsługowej, składającej się z zespołów i podzespołów funkcjonalnych oraz elementów podstawowych. Wyznaczono zbiory sygnałów diagnostycznych i nominalnych w postaci tabelarycznej. Przedstawiono schemat wnioskowania oraz uzyskaną w procesie klasyfikacji bazę wiedzy diagnostycznej.

W rozdziale czwartym opisano autorski komputerowy system diagnostyczny DIAG 2 rozpoznający stany obiektów w logice dwu, trzy i czterowartościowej (2-4VL). Przedstawiono strukturę toru pomiarowego oraz schemat przetwarzania informacji w systemie diagnostycznym. W dalszej części rozdziału opisano przebieg procesu diagnozowania w postaci następujących po sobie etapów dotyczących tworzenia schematu funkcjonalno-diagnostycznego, wprowadzenia danych diagnostycznych, wyznaczenia pomiarowej bazy wiedzy i realizacji procesu wnioskowania. Na koniec przedstawiono sposoby prezentacji wyników uzyskanych w procesie klasyfikacji obiektu.

W dwóch następnych rozdziałach: piątym i szóstym, przedstawiono praktyczną weryfikację wcześniej przyjętych założeń. W tym celu opracowano i opisano dwa stanowiska pomiarowe, w których zrealizowano poszczególne etapy procesu diagnozowania z określeniem stanu obiektu na etapie wnioskowania. Pierwsze stanowisko dotyczy badania systemu sterowania pracą samochodowego silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1, a drugie badania diagnostyki urządzeń elektrowni słonecznej małej mocy. W obydwu przypadkach w procesie klasyfikacji zastosowano komputerowy system diagnostyczny DIAG 2. Analizę procesu wnioskowania przeprowadzono dla tego samego modelu w oparciu o k-wartościową ocenę stanów, gdzie $k = \{2, 3, 4\}$.

W siódmym rozdziale podsumowano uzyskane rezultaty oraz zaprezentowano wnioski. Na koniec przedstawiono kierunki dalszej pracy.

2 Czterowartościowa ocena stanu obiektu technicznego

W celu realizacji procesu diagnozowania złożonych obiektów technicznych z wykorzystaniem czterowartościowej oceny stanów w pierwszej kolejności należy określić podstawowe założenia dotyczące obiektu technicznego i występujących przedziałów zmian cech eksploatacyjnych. Dalsza część rozdziału dotyczy będzie interpretacji stanów obiektu oraz wyznaczenia schemat klasyfikacji stanów wraz z kierunkami ich zmian. Na koniec przedstawione zostaną wybrane wskaźniki przyrostu informacji i efektywności profilaktycznego obsługiwanie w celu porównania k-wartościowej oceny stanu obiektu dla $k = \{2,3,4\}$.

2.1 Interpretacja stanu

Definicja obiektu rozumiana jest jako pojęcie pierwotne, określające w zależności od potrzeb niepodzielny element (bez uwzględniania jego struktury wewnętrznej) lub zbiór elementów tworzących system [140]. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z obiektem prostym, a w drugim z obiektem złożonym. Tak więc, obiekt złożony definiujemy najczęściej jako zbiór elementów wzajemnie ze sobą powiązanych, stanowiących określoną całość i realizujących określone funkcje. Złożonym obiektem technicznym określamy natomiast dowolne urządzenie techniczne charakteryzujące się następującymi cechami [127]:

- złożoną strukturą wewnętrzną wymagającą wnikania wielopoziomowego w celu wyznaczenia składowych komponentów lub elementów podstawowych,
- dużą liczbą i różnorodnością komponentów (elementów podstawowych) wzajemnie ze sobą powiązanych,
- skomplikowanym algorytmem funkcjonowania wynikającym z zaawansowanych właściwości komponentów lub elementów podstawowych,
- wszechstronnością oddziaływania z otoczeniem.

Elementem podstawowym określamy względnie niepodzielną składową część obiektu w ramach analizowania wybranego problemu przy wykorzystaniu określonego modelu obiektu. W dalszej części pracy pod pojęciem „obiekt” będziemy na ogół rozumieli jako złożony obiekt techniczny, a pod pojęciem „element” jako element podstawowy lub element funkcjonalny.

Każdy obiekt określany jest przez wartości wielkości fizycznych charakteryzujących jego właściwości techniczne. Wielkości te zwane cechami eksploatacyjnymi, odzwierciedlają poszczególne stany, w których obiekt może się znaleźć. Tak więc sygnały wyjściowe obiektu zależą od stanów sygnałów na wejściu i stanów jego elementów, co definiujemy następująco [35]:

$$X_i = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (2.1)$$

gdzie: X_i – wyjściowy sygnał diagnostyczny i-tego elementu, Y_1, Y_2, \dots, Y_n – sygnały wejściowe podawane do n-tych wejść elementów obiektu, p_1, p_2, \dots, p_n – parametry charakteryzujące stan obiektu.

Do parametrów charakteryzujących stan obiektu możemy zaliczyć cechy wewnętrzne systemu i oddziałujące na system czynniki zewnętrzne, zwane ogólnie obciążeniami [9]. Jeżeli zapewnimy podanie nominalnych wartości cech sygnałów wejściowych, to na wyjściu obiektu uzyskamy wartość sygnału charakteryzującą jego stan. W przypadku, gdy obiekt jest w stanie zdatności do realizacji założonych zadań, każdej funkcji wejściowej odpowiada ściśle określona wartość funkcji wyjściowej. Zmiana wewnętrznych właściwości obiektu może spowodować odchylenie wartości funkcji wyjściowej poza wartość zmian dopuszczalnych wprowadzając obiekt w stan niezdatności. Otrzymujemy w ten sposób dwuelementowy zbiór stanów $A \in \{1,0\}$, opisujący zdatność użytkową obiektu rozumianą jako zdolność do realizacji zadań w sposób zgodny z wymaganiami dokumentacji eksploatacyjnej [94].

Każda zmiana stanu obiektu i jego przejście ze stanu zdatności do stanu niezdatności wymuszona jest przez określone przyczyny. Powodem tych zmian jest wystąpienie ogólnie rozumianego uszkodzenia obiektu. Definiowane jest ono jako losowe zdarzenie, po wystąpieniu którego obiekt przestaje wypełniać całkowicie lub częściowo, funkcje do jakich został przeznaczony. Uszkodzenie jest zatem losowym naruszeniem zdolności obiektu do poprawnej pracy. Przyczyn uszkodzeń obiektu może być wiele ale najczęściej wynikają one z następujących czynników [105]:

- występowania wad w nim ukrytych, zarówno w elementach oraz w materiałach użytych do ich produkcji,
- występowania zjawiska naturalnego zużycia wskutek wszelkich procesów starzeniowych i innych, w materiałach i konstrukcji obiektów,

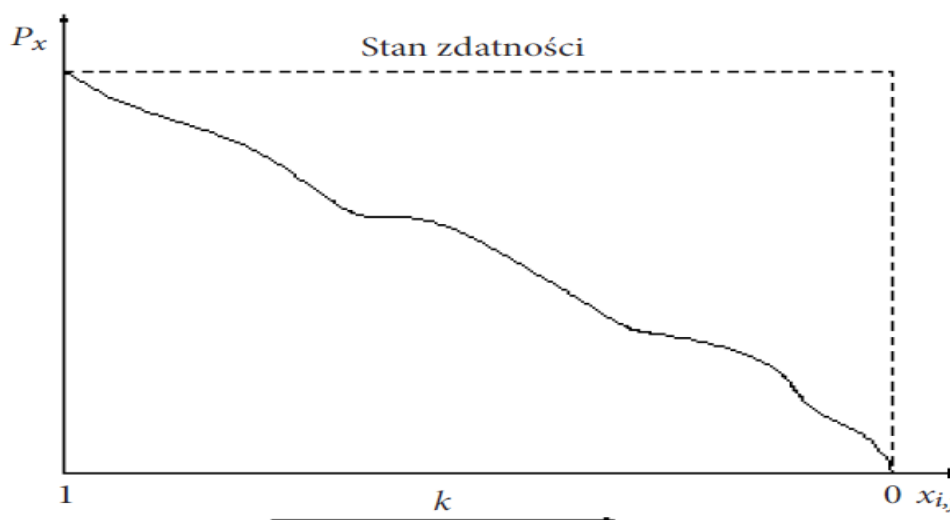
- oddziaływania warunków zewnętrznych towarzyszących procesowi eksploatacji obiektu: temperatury, wilgotności, ciśnienia, wibracji, otaczającej je atmosfery i innych;
- niewłaściwego sposobu eksploatacji obiektu.

Najbardziej charakterystycznymi uszkodzeniami dla obiektów użytkowanych w dłuższym okresie eksploatacji są uszkodzenia katastroficzne i parametryczne [121]. Uszkodzenie katastroficzne obiektu oznacza nagłą (natychmiastową) utratę jego zdolności do wykonywania zadań zgodnie z jego przeznaczeniem. Jest to uszkodzenie całkowite i natychmiastowe, którego chwili wystąpienia nie można przewidzieć. Polega ono na utracie przez obiekt odporności lub wytrzymałości na narażenia (wpływ) środowiska. Usunięcie w obiekcie uszkodzenia tego typu jest możliwe poprzez odnowienie (naprawę nieplanową). Przyczyną powstania uszkodzenia katastroficznego jest przekroczenie w jego elementach konstrukcyjnych wartości krytycznej wytrzymałości lub odporności na narażenia środowiskowe. Natomiast uszkodzenie parametryczne obiektu wyraża się stopniową (powolną) zmianą wartości parametrów, powodując częściowe i powolne uszkodzenie w czasie. Uszkodzenie tego typu może być spowodowane oddziaływaniem kumulujących się bodźców, występowaniem procesu starzenia lub zużywania obiektu. Efektem tego uszkodzenia jest wyjście wartości parametru obiektu poza przedział wartości dopuszczalnych. Usuwanie uszkodzeń parametrycznych w obiekcie wykonuje się za pomocą prac profilaktycznych (naprawa planowa)

Typową intensywność uszkodzeń dla obiektów technicznych długotrwałego użytku możemy podzielić na trzy charakterystyczne okresy [109]:

- I okres związany z początkowym etapem eksploatacji, w którym przeważają uszkodzenia spowodowane defektami strukturalnymi,
- II okres normalnej pracy obiektu, w którym występują wyłącznie uszkodzenia nagłe. Charakteryzuje się on praktycznie stałą intensywnością przejść ze stanu zdatności do stanów niepełnej zdatności lub niezdatności. Rozkład czasu do wystąpienia stanu niepełnej zdatności lub niezdatności przybiera postać wykładniczą
- III okres końcowy, w którym obiekty techniczne użytkowane są po dłuższym czasie. Dla tego okresu eksploatacji obiektów charakterystyczne są uszkodzenia typu parametrycznego, w którym decydujący wpływ mają: starzenie, zużywanie

się, rozregulowania, rozstrojenia itp., Celowym jest więc wprowadzenie większej liczby klas stanów,



Rys. 2.1. Schemat diagnozowania na podstawie przedziału zmiany mierzonej cechy sygnału diagnostycznego $\{X_{i,j}\}$ [49]

gdzie: P_x - x -ty parametr cechy sygnału diagnostycznego; 1 - stan zdatności, 0 - stan niezdatności, k – liczba stanów pośrednich i kierunek ich zmian w logice wielowartościowej

Przykładową zmianę cechy sygnału diagnostycznego dla dwuargumentowego zbioru stanów przedstawiono na rysunku 2.1. Zmiana stanu cechy obiektu odbywa się w sposób ostry i nie uwzględnia informacji dotyczącej przebiegu funkcji degeneracji. W rzeczywistości często mamy do czynienia z pojęciami niepewnymi (nieostrymi) zarówno dla granicy przedziału jak i wpływu funkcji degeneracji. W celu unifikacji reguł wnioskowania dla badanych cech obiektu określanych w sposób jednoznaczny lub nieprecyzyjny możemy posłużyć się funkcją przynależności $f(A)$ do zbioru $\{A\}$. Funkcja ta określa stopień przynależności poszczególnych cech do elementów zbioru $\{A\}$. Dla pojęcia pewnego (ostrego), w którym istniejące cechy pozwalają zawsze wyróżnić stan elementu funkcja przynależności przyjmuje postać funkcji klasycznej o wartości „0” lub „1”. Funkcja przynależności $f(A)$ określona na dwuargumentowym zbiorze stanów $\{A\}$ ma następującą postać [49]:

$$f(A^2) \rightarrow [1,0] \quad (2.2)$$

gdzie: $f(A^2)$ – funkcja przynależności dla logiki dwuwartościowej, 1 – stan zdatności obiektu technicznego, 0 – stan niezdatności obiektu technicznego.

W diagnostyce obiektów technicznych zastosowanie logiki dwuwartościowej może być odpowiednie w przypadku, gdy chcemy określić jedynie stan zdatności obiektu. Jednak podczas realizacji procesu obsługiwanego (odnawiania) obiektu zastosowanie zbioru dwustanowego może być niewystarczające, dlatego w praktyce diagnostycznej zaczęto dążyć do zwiększenia liczby stanów. Podstawą budowy takiego zbioru jest logika trójwartościowa opracowana przez polskiego matematyka J. Łukasiewicza [114], w której zinterpretowano pośredni stan częściowej zdatności. Wykorzystanie stanu pośredniego w diagnostyce obiektów technicznych przyniosło wymierne korzyści, szczególnie w aspekcie wykorzystania diagnoz w inteligentnych systemach wspomagających procesy obsługowe [26, 30]. Jedną z głównych korzyści stosowania trójargumentowego zbioru stanów $\{2,1,0\}$ było zwiększenie efektu informacyjnego poprzez uzyskanie możliwości określenia dodatkowego stanu, w którym mogą znaleźć się cechy eksploatacyjne diagnozowanego obiektu. Mimo, że diagnostyka w logice trójwartościowej nadal intensywnie się rozwija to w ostatnich latach zaczęto zwracać uwagę na logiki k-wielowartościowe dla $k > 3$. Jeżeli przyjmiemy, że znamionym w logice trójwartościowej jest stan niepełnej zdatności to w logice czterowartościowej ($k=4$) stanem szczególnym będzie stan krytycznej zdatności. Funkcja przynależności określana będzie natomiast w czteroargumentowym zbiorze stanów:

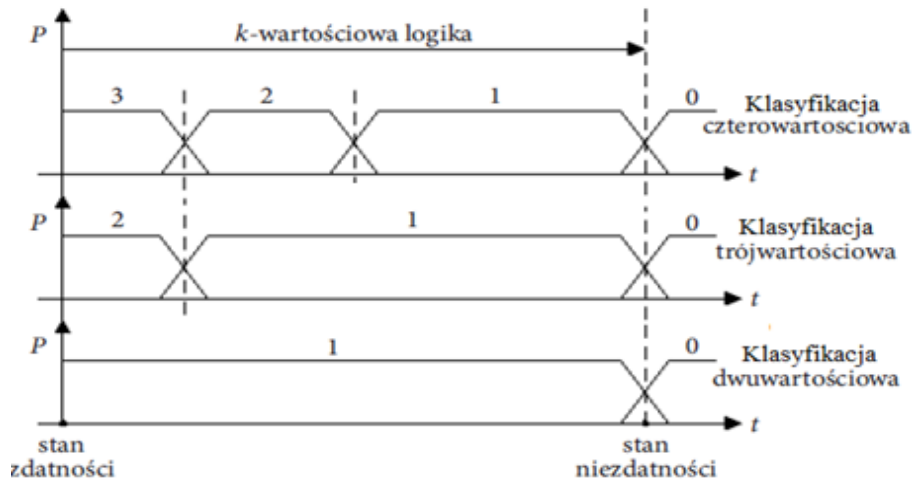
$$f(A^4) \rightarrow [3,2,1,0] \quad (2.3)$$

gdzie: $f(A^4)$ – funkcja przynależności dla logiki czterowartościowej, 3 – stan zdatności obiektu technicznego, 2 i 1 – stany pośrednie obiektu 0 – stan niezdatności obiektu.

W diagnostyce technicznej problematyka rozpoznania stanu zdatności krytycznej nabiera szczególnego znaczenia, ze względu na fakt określenia elementów konstrukcyjnych znacząco zaniżających efektywność użytkowania obiektu. Znając proces niezawodności tej klasy elementów, można z dużym prawdopodobieństwem zakładać, że w krótkim czasie element przejdzie w stan niezdatności (awarii). W praktyce dąży się do stosowania takiej wartościowości opisującej stan badanego obiektu, która będzie najlepiej (najbardziej wiarygodnie) identyfikowała stan obiektu.

Schemat klasyfikowania stanów obiektu technicznego w logikach k-wartościowych przedstawiono na rysunku 2.1. Z analizy tego schematu wynika, że podstawą podziału do $k-1$ klas wnioskujących (dla $k > 2$) jest przedział stanu zdatności „1” logiki

dwuwartościowej. Istota wnioskowania w logikach k-wartościowych polega zatem na specyficznym podziale tego przedziału. Stąd, dla logiki trójwartościowej przedział ten podzielony jest na dwa podprzedziały, a mianowicie przedział zdatności i niepełnej zdatności. W logice czterowartościowej przedział pośredni podzielony jest również na dwa podprzedziały: częściowej zdatności i krytycznej zdatności.



Rys. 2.2. Schemat wnioskowania statystycznego w logikach k-wartościowych [49]

gdzie: P - parametr cechy sygnału diagnostycznego, t – czas w którym cecha sygnału ulega zmianie, $\{0,1,2,3\}$ – zbiór możliwych do wystąpienia stanów w logice k-wartościowej dla $k \leq 4$

Przedział określający stan niezdatności jest adekwatny dla wszystkich k-klas wnioskowania. Można zatem stwierdzić, że zwiększanie k-tych klas wnioskowania w logikach k-wartościowych to bardziej dokładne wyznaczenie struktur diagnostycznych obiektu poprzez wnikanie w przedział stanu zdatności. Każdy proces tworzenia nowej k-tej klasy wnioskowania przynosi dodatkowy uzysk wyznaczonej informacji diagnostycznej, określonej w stanach pośrednich między stanem zdatności i niezdatności. Niestety, jak wykazano w dalszej części pracy uzysk dodatkowej informacji maleje wraz ze wzrostem liczby stanów. Powoduje to sytuację, w której zwiększanie liczby stanów może nie dać wymiernych korzyści w stosunku do kosztów poniesionych w związku z wdrożeniem większej liczby stanów w systemach diagnostycznych.

2.2 Klasy stanów w ocenie czterowartościowej

Wyznaczone w procesie diagnozowania podzbiory elementów $\{e_i\}$ dla czterowartościowej oceny stanów obiektu określono na podstawie analizy logiki

trójwartościowej [29, 34] oraz stanów obiektu określonych w polskich normach dotyczących niezawodności i jakości obsługi [134]. Stan obiektu oraz przypisane im przedziały zmian wartości cechy i -tego sygnału diagnostycznego w logice czterowartościowej możemy opisać jednym z następujących stanów: zdatności, niepełnej zdatności, krytycznej zdatności i niezdatności [1].

2.2.1 Stan zdatności

Stan oznaczony wartością "3", określa taki stan obiektu, w którym realizuje on zadania zgodnie z przeznaczeniem, przy założeniu, że wartości cech sygnałów wejściowych znajdują się w przedziałach zmian dopuszczalnych X_j . W tym stanie obiektu wartości cech sygnału X_i mieszczą się w przedziale nazwanym przedziałem zmian nieistotnych określanych następującą zależnością:

$$R_{w1}: \forall_{X_k \in X} \{X_k \in (X_i^{3'}, X_i^3)\} \Rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^3) = \{3\} \quad (2.4)$$

gdzie: R_{w1} – 1-sza reguła wnioskowania diagnostycznego, $(X_i^{3'}, X_i^3)$ - przedział zmian nieistotnych wartości cech sygnału, $\{3\}$ – stan zdatności

2.2.2 Stan niepełnej zdatności

Stan oznaczony wartością "2", określa stan obiektu posiadającego zdolność do niepełnego wykonania zadania, przy założeniu, że sygnały wejściowe znajdują się w przedziałach zmian dopuszczalnych wartości cech sygnałów X_j . W tym stanie zmiana wartości przynajmniej jednej cechy sygnału X_i musi mieścić się w przedziale nazwanym przedziałem zmian istotnych określanych następującą zależnością:

$$R_{w2}: \exists_{X_k \in X} \{X_k \in (X_i^{2'}, X_i^{3'}) \cup (X_i^3, X_i^2)\} \Rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^2) = \{2\} \quad (2.5)$$

gdzie: R_{w2} – 2-ga reguła wnioskowania diagnostycznego, $(X_i^{2'}, X_i^{3'}) \cup (X_i^3, X_i^2)$ - przedział zmian istotnych wartości cech sygnału, $\{2\}$ – stan niepełnej zdatności.

2.2.3 Stan krytycznej zdatności

Stan oznaczony wartością "1", określa stan obiektu charakteryzujący się zdolnością do wypełniania niektórych lecz nie wszystkich jego funkcji, przy założeniu, że sygnały wejściowe znajdują się w przedziałach zmian dopuszczalnych wartości cech sygnałów X_j . W tym stanie zmiana wartości przynajmniej jednej cechy sygnału X_i musi mieścić

się w przedziale nazwanym przedziałem zmian krytycznych określanych następującą zależnością:

$$R_{w3}: \exists_{X_k \in X} \{X_k \in (X_i^{1'}, X_i^{2'}) \cup (X_i^2, X_i^1)\} \Rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^1) = \{1\} \quad (2.6)$$

gdzie: R_{w3} – 3-cia reguła wnioskowania diagnostycznego, $(X_i^{1'}, X) \cup (X_i^2, X_i^1)$ - przedział zmian krytycznych wartości cech sygnału, $\{1\}$ – stan krytycznej zdatności.

2.2.4 Stan niezdatności

Stan oznaczony wartością "0", określa stan obiektu posiadającego całkowitą niezdolność do wykonywania swoich zadań, przy założeniu, że sygnały wejściowe znajdują się w przedziałach zmian niedopuszczalnych wartości cech sygnałów X_j . W tym stanie zmiana wartości przynajmniej jednej cechy sygnału X_i musi mieścić się w przedziale nazwanym przedziałem zmian niedopuszczalnych określanych następującą zależnością:

$$R_{w4}: \exists_{X_k \in X} \{X_k \in (-\infty, X_i^{1'}) \cup (X_i^1, +\infty)\} \Rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^0) = \{0\} \quad (2.7)$$

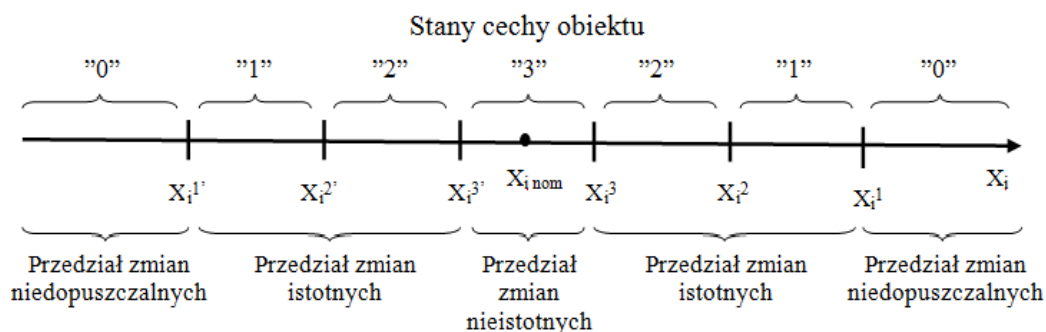
gdzie: R_{w4} – 4-ta reguła wnioskowania diagnostycznego, $(-\infty, X_i^{1'}) \cup (X_i^1, +\infty)$ - przedział zmian niedopuszczalnych wartości cech sygnału, $\{0\}$ – stan niezdatności.

2.3 Przedziały i kierunki zmian stanów obiektu technicznego

Badanie sygnału wyjściowego X_i polega na pomiarze jego cech i porównaniu wyniku pomiaru badanego z cechą sygnału wzorcowego $X_{(w),i}$. Zamiast porównywać sygnał wyjściowy z wzorcem, znacznie prościej jest sprawdzić czy wartości sygnałów diagnostycznych mieszczą się w ich zakresie zmian dopuszczalnych. Przedziały zmian wartości cechy sygnału diagnostycznego dla logiki czterowartościowej przedstawiono na rysunku 2.3. Wyróżniono w nim następujące trzy przedziały zmian [44]:

- **przedział zmian nieistotnych** sygnału $(X_i^{3'}, X_i^3)$ określający stan cechy obiektu na poziomie "3" i reprezentujący stan zdatności,

- **przedział zmian istotnych** sygnału $(X_i^{1'}, X_i^{3'}) \cup (X_i^3, X_i^1)$ określający stan cechy obiektu na poziomie "1" lub "2" i reprezentujący dwa stany: niepełnej zdatności oraz krytycznej zdatności,
- **przedział zmian niedopuszczalnych** sygnału $(-\infty, X_i^{1'}) \cup (X_i^1, +\infty)$ wskazujący stan cechy obiektu na poziomie "0" i reprezentujący stan niezdatności (awarii) elementu składowego obiektu dla danego sygnału.



Rys. 2.3. Przedziały zmian wartości cechy i-tego sygnału diagnostycznego [1]

gdzie: $(X_i^{3'}, X_i^3)$ – przedział zmian nieistotnych, $((X_i^{1'}, X_i^{3'}) ; (X_i^3, X_i^1))$ przedział zmian istotnych, $((-\infty, X_i^{1'}) ; (X_i^1, +\infty))$ – przedział zmian niedopuszczalnych

W przypadku wystąpienia konieczności zbadania więcej niż jednej cechy sygnału wyjściowego Y, należy sprawdzić dla każdej z tych cech, czy znajduje się ona w przedziale zmian dopuszczalnych. Dany sygnał można wtedy wyznaczyć z zależności:

$$X_i = \prod_{n=1}^N X_{in} = X_{i1} \wedge X_{i2} \wedge \dots \wedge X_{iN} \quad (2.8)$$

gdzie: X_i – sygnał diagnostyczny na wyjściu i-tego elementu funkcjonalnego, X_{in} – sygnał wyjściowy określający n-tą cechę w i-tym elemencie

Jeżeli stan elementu e_i oznaczony zostanie przez ε_i , to wykorzystując logikę czterowartościową otrzymamy:

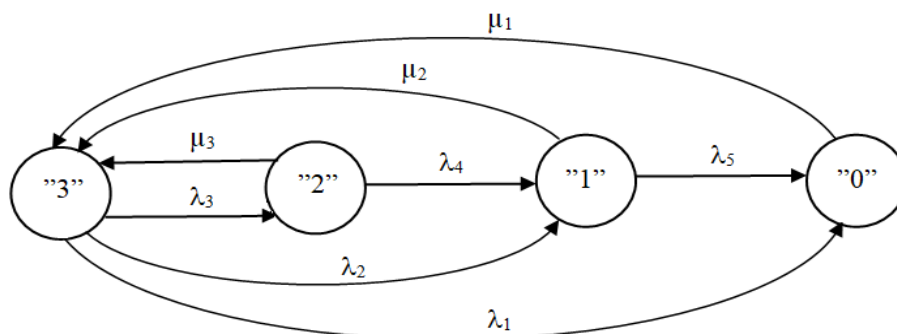
$$\begin{aligned} \mathcal{A}(e_i) = \varepsilon_i^0 &\Leftrightarrow \varepsilon_i = 0 \\ \mathcal{A}(e_i) = \varepsilon_i^1 &\Leftrightarrow \varepsilon_i = 1 \\ \mathcal{A}(e_i) = \varepsilon_i^2 &\Leftrightarrow \varepsilon_i = 2 \\ \mathcal{A}(e_i) = \varepsilon_i^3 &\Leftrightarrow \varepsilon_i = 3 \end{aligned} \quad (2.9)$$

gdzie: ε_i^0 – stan niezdatności elementu e_i ; ε_i^1 – stan zdatności krytycznej elementu e_i ; ε_i^2 – stan niepełnej zdatności elementu e_i ; ε_i^3 – stan zdatności elementu e_i

Możliwe kierunki zmian stanów badanego obiektu przedstawiono na rysunku 2.4. Wynika z niego, że każdy stan pośredni w logice wielowartościowej dla $k > 2$ posiada dwa kierunki przejścia związane ze średnią intensywnością uszkodzeń μ i średnią intensywnością odnowy λ . Obydwa pojęcia wynikające z teorii niezawodności określają zdarzenia lub celowe działania w obiekcie odnawialnym, powodujące jego przejście między stanami [98, 121]. Uśredniona intensywność uszkodzeń obiektu wyznaczająca stosunek intensywności uszkodzeń obiektu do liczby jego elementów, definiuje przejście ze stanu wyższego do niższego w kierunku stanu niezdatności. W zależności od tego w którym stanie znajdował się obiekt, dla logiki czterowartościowej uszkodzenia mogą przyjmować postać typu parametrycznego, krytycznego lub katastroficznego.

Drugi kierunek dotyczy celowych działań realizowanych na obiekcie odnawialnym w celu doprowadzenia go do stanu zdadności (naprawy). Uśredniony stosunek intensywności odnowy obiektu do liczby jego elementów, definiuje przejście z dowolnego stanu obiektu bezpośrednio do stanu najwyższego. Możemy więc wyróżnić intensywność pełnej odnowy w przypadku przejścia ze stanu niezdatności lub częściowej odnowy dla stanów pośrednich [76].

Z analizy rysunku 2.4. oraz kierunków zmian stanów obiektu wynika, że dodawanie kolejnych stanów w logice wielostanowej dla liczby $k > 2$ powoduje analogiczne zachowanie kierunków zmian jak dla logiki z mniejszą liczbą stanów ($k-1$). Każdy nowy stan obiektu umieszczony w przedziale zmian istotnych definiuje kierunek przejścia w przypadku średniej intensywności uszkodzeń do stanu niższego. Sytuacja odwrotna występuje w przypadku średniej intensywności odnowy, gdzie kierunek zmiany następuje do stanu najwyższego (zdatności). Nie istnieje zatem kierunek przejścia obiektu w przypadku średniej intensywności odnowy do pośredniego stanu wyższego.



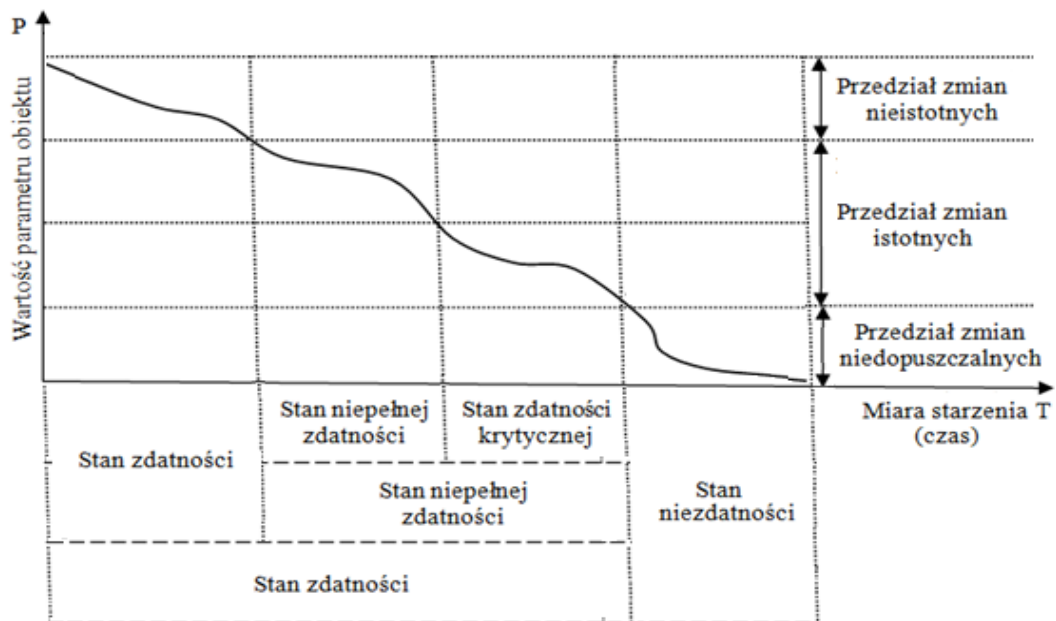
Rys. 2.4. Graf zmian stanów obiektu w logice czterowartościowej

gdzie: μ_1 – średnia intensywność pełnej odnowy obiektu obsługi, μ_2 i μ_3 – średnia intensywność częściowej odnowy obiektu, λ_1 – średnia intensywność uszkodzeń nagłych typu katastroficznego, λ_2 – średnia intensywność uszkodzeń nagłych typu krytycznego, λ_3 – średnia intensywność uszkodzeń częściowych obiektu typu parametrycznego, λ_4 – średnia intensywność uszkodzeń częściowych obiektu typu krytycznego, λ_5 – średnia intensywność uszkodzeń całkowitych typu katastroficznego.

Przedstawiony powyżej graf zmian stanów obiektu stanowi uzupełnienie podrozdziału, natomiast dokładniejsze omówienie wskaźników teorii niezawodności wykracza poza zakres powyższej pracy.

2.4 Schemat klasyfikacji stanów w logice 2-4 wartościowej

Wprowadzenie w diagnostyce technicznej czwartego stanu w postaci zdatności krytycznej, prowadzi do zwiększenia ilości uzyskanej informacji dotyczącej krzywej degeneracji badanego parametru obiektu technicznego. Ma to istotne znaczenie w przypadku działań obsługowych zmniejszając prawdopodobieństwo wystąpienia stanu niezdatności, a co za tym idzie zwiększając czas pracy obiektu [80, 152]. Schemat klasyfikacji z dodanym czwartym stanem oraz przypisanym mu przedziałem zmian istotnych przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Schemat klasyfikacji stanów obiektu w logice dwu, trzy i czterowartościowej [1]

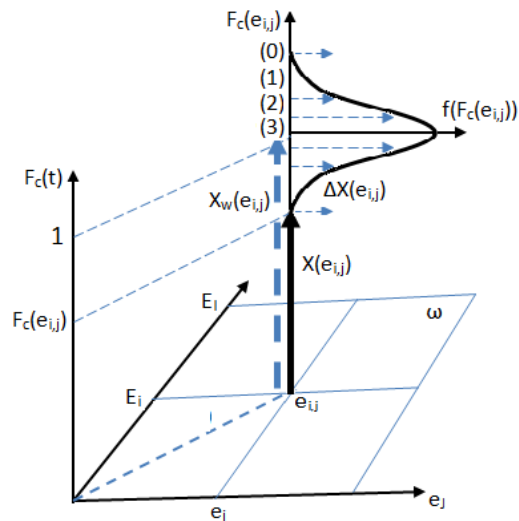
Dodatkowy stan zdefiniowany poprzez podział stanu niepełnej zdatności dla logiki trójwartościowej mieści się również w przedziale zmian istotnych. Granice przedziałów decyzyjnych określające stan zdatności oraz niezdatności dla liczby stanów $k > 2$ nie ulegają zmianie przy wprowadzaniu kolejnych stanów. Każdy dodatkowy stan dzieli stan istotny z logiki $k-1$ na dwa stany o wielkości określonej przedziałami zmian wartości cech sygnału. Można przyjąć, że przejścia obiektu pomiędzy stanami są jednakowo prawdopodobne.

W literaturze wykazano, że jednoczesne wystąpienie dwóch stanów np. stanu zdatności i niepełnej zdatności, elementów podstawowych typowych obiektów technicznych wynosi poniżej 0,1 [148]. Jeżeli przyjmiemy, że przejście obiektu pomiędzy stanami odbywa się z jednakowym prawdopodobieństwem to obiekt może znajdować się w danym czasie t tylko w jednym ze zbioru dostępnych stanów: $\{3,2,1,0\}$.

Pomimo coraz powszechniejszego stosowania logiki i zbiorów rozmytych w opisie granic przedziałów zmian stanów [90, 112], pominięto te zagadnienie, przyjmując ich ostrą postać. Prowadzone przez autora badania nad zastosowaniem sztucznej inteligencji w procesie diagnostycznym wykraczają poza zakres powyższej pracy.

2.5 Model zmiany stanu w procesie użytkowania

W procesie eksploatacji, stan użytkowanego obiektu technicznego różni się od jego stanu nominalnego dla którego obiekt był projektowany. Powstająca w ten sposób różnica powoduje wystąpienie niekorzystnego efektu zmiany własności cech użytkowych, a jakość użytkowanego obiektu ulega obniżeniu. Z występującego w literaturze zbioru wskaźników charakteryzujących proces użytkowania obiektu, wielkością najbardziej odzwierciedlającą własności użytkowe jest funkcja jakości użytkowania $F_c(t)$ oraz obliczany dla jej wartości granicznej współczynnik jakości użytkowania obiektu F_c [75, 117, 150-153].



Rys. 2.6. Schemat zmiany stanów cech eksploatacyjnych obiektu w czasie użytkowania

gdzie: E_i – struktura i -tego zespołu funkcjonalnego, e_j – j -ty element podstawowy i -tego zespołu obiektu, $F_c(e_{i,j})$ – wartość nominalnej funkcji użytkowania elementu ($e_{i,j}$), $f(F_c(e_{i,j}))$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa jakości użytkowania elementu ($e_{i,j}$), $[X(e_{i,j})]$ – wektor rzeczywistego sygnału diagnostycznego, $[X_w(e_{i,j})]$ – wektor wzorcowego sygnału diagnostycznego, $[\Delta X(e_{i,j})]$ – wektor różnicowej metryki sygnału diagnostycznego wyznaczonej dla elementu ($e_{i,j}$)

Ocena stanu obiektu reprezentowana przez wskaźnik jakości użytkowania może zostać uznana za jego miarę. Schemat zmiany stanów elementów podstawowych $e_{i,j}$ w procesie użytkowania obiektu przedstawiono na rysunku 2.6. Możemy na nim zauważyć występowanie pewnej rozbieżności dla wartości elementarnych funkcji użytkowania $F_c(e_{i,j})$. Pomiedzy stanem faktycznym obiektu opisanym przez wektor rzeczywistych sygnałów diagnostycznych $[X(e_{i,j})]$, a jego stanem nominalnym opisanym przez wektor sygnałów wzorcowych $[X_w(e_{i,j})]$ powstaje dyferencja w postaci wektora różnicowej metryki sygnału diagnostycznego $[\Delta X(e_{i,j})]$. Uzyskany w ten sposób zbiór wektorów $\{[\Delta X(e_{i,j})]\}$ wyznacza przestrzeń $\omega(e_{i,j})$ określającą cechy eksploatacyjne elementów w aktualnym czasie użytkowania obiektu. Ze względów praktycznych miarom wektorów sygnałów diagnostycznych różnicowej metryki $[\Delta X(e_{i,j})]$ przyporządkowano pojęcia stanów obiektu [5, 6, 11, 16, 133].

Ponieważ elementarne wektory sygnałów diagnostycznych występujących w obiekcie mogą mieć różną postać oraz wymiar to należy zniwelować zbyt duże dysproporcje pomiędzy wartościami tych wektorów w poszczególnych wymiarach.

Jedną z efektywnych metod transformacji danych wejściowych (wektorów sygnałów) jest normalizacja danych w przedziale [0,1]. Proces ten polega na redefinicji k-tych składowych wektora sygnałów diagnostycznych $[X(e_{i,j})]$ za pomocą następującej zależności [144]:

$$F_c(e_{i,j}) = \frac{X(e_{i,j})_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (X(e_{i,j}))_k^2}} \quad (2.10)$$

gdzie: $F_c(e_{i,j})$, - funkcja jakości użytkowania, $X(e_{i,j})$ – sygnał diagnostyczny j-tego elementu w i-tym zespole funkcjonalnego i k - podzbiór parametrów fizycznych określających elementarne własności użytkowe j-tego elementu w i-tym zespole funkcjonalnym

2.6 Czterowartościowa ocena stanów w aspekcie informacyjnym

Obiekt techniczny w każdej chwili znajduje się w jednym z możliwych dla niego stanów fizycznych. Liczba tych stanów obiektu zależy od jego struktury, liczby rozróżnianych klas stanów oraz głębokości wnikania w jego strukturę. W przypadku idealnym, użytkownik może wyróżnić i zapamiętać wszystkie stany obiektu. Wyróżniona wówczas informacja o obiekcie rozumiana jest jako informacja maksymalna i zarazem możliwa do uzyskania. W rzeczywistości informacja uzyskiwana w procesie diagnozowania obiektu związana jest z możliwościami użytkownika. Niezmienna pozostaje natomiast informacyjność obiektu, a zmieniają się relacje rzeczywistego obserwatora do obiektu oraz warunki badania. Maksymalna, możliwa do uzyskania przez użytkownika ilość informacji, jest to wielkość będąca funkcją liczby wszystkich stanów fizycznych, które są możliwe do zaobserwowania w obiekcie. Informacja maksymalna w sensie ilościowym zależy od własności obiektu badania, możliwości i doświadczenia badającego, a także od poziomu szczegółowości informacji. Do informacji maksymalnej można się zbliżyć poprzez rozróżnienie jak największej liczby stanów.

W oparciu o literaturę przedstawiono poniżej wybrane wskaźniki określające miarę ilości i funkcję przyrostu uzyskanej informacji oraz efektywność profilaktycznego obsługiwanego technicznego.

2.6.1 Miara ilości uzyskanej informacji diagnostycznej

Jednym z podstawowych zadań procesu diagnostycznego jest pozyskiwanie informacji określonej zwykle w sposób ilościowy. W oparciu o ilościową teorię informacji za miarę nieokreśloności doświadczenia z k-jednakowo prawdopodobnych wyników przyjmujemy wartość $\log k$. Stąd ilość informacji odpowiadająca pojawieniu się zdarzenia A z prawdopodobieństwem $P(A)$ obliczamy z zależności [148]:

$$I_k(A) = \log_k \frac{1}{P(A)} \quad (2.11)$$

gdzie: $I_k(A)$ – ilość możliwej do uzyskania informacji dla k stanów,

$P(A)$ – prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia A

Jeżeli przyjmiemy, że w ocenie stanu obiektu diagnostycznego występują cztery równoprawne stany ($k = 4$), to na podstawie zależności (2.11) ilość możliwej do uzyskania informacji wynosi:

$$I_4(A) = \log_4 \frac{1}{P(A)} = 0,79 \cdot \log_3 \frac{1}{P(A)} = 0,5 \cdot \log_2 \frac{1}{P(A)} = 1,262 \cdot I_3(A) = 2 \cdot I_2(A) \quad (2.12)$$

Elementarny sygnał czwórkowy I_4 dostarcza 1,262 razy więcej informacji niż sygnał trójkowy I_3 oraz 2 razy więcej informacji od sygnału dwójkowego I_2 . Analogiczne porównanie z sygnałem trójkowym równym $I_3 = 1,585 \cdot I_2$ wskazuje, że różnica w dostarczonej informacji pomiędzy kolejnymi stanami (dla $k > 3$) ulega zmniejszeniu.

2.6.2 Funkcja przyrostu dodatkowej informacji diagnostycznej

Drugim ze wskaźników dotyczącym pozyskiwania dodatkowej informacji diagnostycznej jest zaproponowana przez S. Duera [38] funkcja przyrostu dodatkowej informacji diagnostycznej $f(P_{inf \text{ diag}})$. Określa ona dodatkowy uzysk informacji wyznaczonej w procesie diagnozowania w stosunku do logiki 2-wartościowej. Taki przyrost dodatkowej informacji jest szczególnie widoczny w praktyce, w przypadku działań obsługowych z obiektem technicznym [27]. Wartość funkcji $f(P_{inf \text{ diag}})$ wyznaczamy na podstawie zależności:

$$f(P_{inf \text{ diag}}) = \frac{L_{st \text{ dod}}}{L_{st \text{ cal}}} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

gdzie: $f(P_{\text{inf diag}})$ – funkcja przyrostu dodatkowej informacji diagnostycznej, $L_{\text{st dod}}$ – liczba stanów dodatkowych (np. liczba stanów częściowej zdatności w cztero-wartościowej ocenie stanów), $L_{\text{st cal}}$ – całkowita liczba stanów wyznaczonych w procesie diagnostycznym.

Jak wynika z zależności (2.13) zastosowanie czterech stanów w procesie diagnozowania pozwala uzyskać 50% przyrost informacji w stosunku do logiki dwustanowej. W przypadku zastosowania trzech stanów przyrost wynosi 33%, więc dodanie czwartego stanu zwiększa uzysk dodatkowej informacji o 17%. Przy dalszym zwiększaniu liczby stanów wartość przyrostu dodatkowej informacji ulega stopniowemu zmniejszaniu. Analizując wyniki uzyskane na podstawie wzorów (2.12) i (2.13) możemy zauważyć, że:

- przejście z logiki dwustanowej do czterostanowej daje nam wymierny (dwukrotny) wzrost wnoszonej informacji dla sygnału elementarnego i 50% przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej,
- przejście z logiki trójstanowej do czterostanowej pozwala uzyskać nieznaczny ($0,415 I_2$) wzrost wnoszonej informacji dla sygnału elementarnego oraz 17% przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej,
- przyjmując niewielkie koszty związane z rozszerzeniem liczby stanów w procesie diagnozowania warto jest rozważyć celowość wprowadzenia do tego procesu czterech stanów.

2.6.3 Efektywność profilaktycznego obsługiwanie technicznego

Wprowadzenie dodatkowego stanu charakteryzującego obiekt technicznych oprócz zwiększenia dostępnej informacji diagnostycznej powoduje również zwiększenie zakresu przedziału zmian istotnych. Rozpoznanie jednego ze stanów częściowej lub krytycznej zdatności, należących do tego przedziału, powinno skutkować podjęciem decyzji o przeprowadzeniu profilaktycznej odnowy technicznej. Działanie to ma na celu doprowadzenie eksploatowanego obiektu technicznego ponownie do stanu zdatności, czyli do przedziału zmian nieistotnych [1].

Obsługiwanie profilaktyczne przeprowadza się według zasad prawdopodobieństwa usunięcia niepełnej zdatności $p_z = 1$. Jeżeli przyjmujemy, że w czasie eksploatacji obiektu technicznego do momentu jego uszkodzenia średnia liczba wystąpień stanu

częściowej zdatności $n^2(t)$, krytycznej zdatności $n^1(t)$ i niezdatności $n^0(t)$ równa się jeden to współczynnik rodzaju niezdatności $A(t)$ wynosi:

$$A(t) = \frac{n^2(t) + n^1(t)}{n^2(t) + n^1(t) + n^0(t)} = 0,66 \quad (2.14)$$

gdzie: $A(t)$ – współczynnik rodzaju niezdatności, $n^2(t)$ – liczba częściowych zdatności, $n^1(t)$ – liczba krytycznych zdatności, $n^0(t)$ – liczba niezdatności

Uwzględniając zależność (2.14) możemy wyznaczyć efektywność profilaktycznego obsługiwanego technicznego E_{pot} , która wynosi [77]:

$$E_{pot} = \frac{T_{op}}{T_o} = \frac{1}{1 - A(t)} = 3 \quad (2.15)$$

gdzie: E_{pot} – efektywność profilaktycznego obsługiwanego, T_{op} – średnia wartość czasu poprawnego działania obiektu, w którym przeprowadza się obsługiwane profilaktyczne, T_o – średnia wartość czasu poprawnego działania obiektu, w którym nie przeprowadza się obsługiwanego profilaktycznego

Z powyższych wyliczeń uzyskanych ze wzoru (2.15) wynika że wprowadzenie dodatkowego stanu w procesie obsługiwanego technicznego zwiększa trzykrotnie wartość przeciętnego czasu bezawaryjnej pracy obiektu. Dla porównania w przypadku logiki trójstanowej wartość ta wynosi $E_{pot} = 2$.

2.7 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale opracowano teoretyczne podstawy czterowartościowej oceny stanów wykorzystywanej w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych. Dokonano interpretacji obiektu technicznego oraz występujących w nim przedziałów zmian cech eksploatacyjnych. Dla wyznaczonych przedziałów zmian zdefiniowano następujące klasy stanów w logice czterowartościowej ($k=4$), a mianowicie: stan zdatności „3”, stan niepełnej zdatności „2”, stan krytycznej zdatności „1” i stan niezdatności „0”.

Na podstawie wyznaczonych stanów określono schemat klasyfikacji oraz możliwe kierunki ich zmian w obiekcie technicznym. Wyznaczony schemat klasyfikacji porównano z odpowiadającymi stanami w logice dwu i trójwartościowej.

Na koniec przedstawiono wybrane wskaźniki przyrostu informacji i efektywności profilaktycznego obsługiwanie w celu porównania k-wartościowej oceny stanu obiektu dla $k = \{2,3,4\}$. Wykazano, że miara ilości uzyskanej informacji dla elementarnego sygnału czwórkowego I_4 dostarcza 1,262 razy więcej informacji niż sygnał trójkowy I_3 oraz 2 razy więcej informacji od sygnału dwójkowego I_2 . Analogiczne porównanie z sygnałem trójkowym równym $I_3 = 1,585 I_2$ wskazuje, że różnica w dostarczonej informacji pomiędzy kolejnymi stanami (dla $k>3$) ulega zmniejszeniu.

Kolejny wskaźnik określany funkcją przyrostu informacji diagnostycznej $f(P_{\text{inf diag}})$ dla logiki czterostanowej pozwala uzyskać 50% przyrost w stosunku do logiki dwustanowej. W przypadku zastosowania trzech stanów przyrost wynosi 33%, więc dodanie czwartego stanu zwiększa uzysk dodatkowej informacji o 17%.

Natomiast wprowadzenie dodatkowego stanu w procesie obsługiwanie technicznego zwiększa trzykrotnie E_{pot} wartość przeciętnego czasu bezawaryjnej pracy obiektu. Dla porównania w przypadku logiki trójstanowej wartość ta wynosi $E_{\text{pot}}= 2$.

3 Diagnozowanie obiektów technicznych w cztero-wartościowej ocenie stanu

Mając określone podstawy teoretyczne czterowartościowej oceny stanów obiektu technicznego należy wyznaczyć etapy procesu diagnostycznego i struktury wewnętrzne modelu funkcjonalno-diagnostycznego oraz występujące między nimi relacje. Dalszą część rozdziału dotyczyć będzie zdefiniowania reguł dekompozycji modelu do czterech poziomów struktury obsługowej, składającej się z zespołów i podzespołów funkcjonalnych oraz elementów podstawowych. Następnie wyznaczone zostaną zbiory sygnałów diagnostycznych i nominalnych w postaci tabelarycznej. Na koniec przedstawiony zostanie schemat wnioskowania oraz uzyskana w procesie klasyfikacji baza wiedzy diagnostycznej.

3.1 Charakterystyka procesu diagnozowania

W procesie eksploatacji urządzenie techniczne znajduje się w dowolnej chwili w jednym z możliwych dla niego stanów fizycznych. W wyniku oddziaływania na takie urządzenie wielu zewnętrznych i wewnętrznych czynników wymuszających, stan urządzenia ulega zmianie. Powstałe zmiany wynikają głównie z procesu zużywania potencjału użytkowego, czyli degeneracji właściwości obiektu [7]. Uzyskanie informacji o tego typu zmianach jest treścią zadania diagnostycznego. Natomiast wszystkie operacje zmierzające do rozwiązania takiego zadania nazywamy procesem diagnostycznym. Zarówno zadania jak i procesy diagnostyczne należą do dziedziny nauki i techniki zwanej diagnostyką techniczną. Zajmuje się ona opracowaniem oraz wykorzystaniem metod i środków służących badaniom stanu technicznego urządzeń (obiektów) [138]. Wynikiem przeprowadzonych w procesie diagnozowania czynności dotyczących badania i wnioskowania o stanie obiektu, jest sformułowanie diagnozy. Oprócz zbioru informacji o stanie obiektu, diagnozy zawierają dodatkową informację potrzebną do podjęcia decyzji dotyczącej dalszego postępowania z obiektem tj. wykonania czynności profilaktycznych, naprawczych oraz podejmowaniu decyzji o wprowadzaniu zmian w konstrukcji lub eksploatacji. Czynności naprawcze określają głównie działania polegające na regulacji, naprawie oraz wymianie elementów lub całych obiektów.

Czynności dotyczące badania stanu obiektu technicznego realizowane są na podstawie analizy i porównywania wartości wektora sygnału diagnostycznego z jego

wektorem wzorcowym. Przed wykonaniem powyższych czynności procesu diagnozowania, istotnym jest wyznaczenie wartości zbioru pomiarowych i ich wzorcowych sygnałów diagnostycznych.

Poprzez sygnały diagnostyczne rozumiemy informacje o stanie obiektu definiowane jako wielkości fizyczne generowane przez ten obiekt. Każdy tak określony sygnał diagnostyczny jest równocześnie nośnikami informacji diagnostycznej. Na podstawie wartości badanych sygnałów diagnostycznych określamy w procesie wnioskowania stan techniczny obiektu oraz lokalizację uszkodzeń elementów podstawowych. Wyznaczenie oceny stanu wiąże się więc z badaniem relacji sygnał diagnostyczny - stan obiektu, w której należy uwzględnić następujące warunki:

- uzyskanie informacji diagnostycznej na odpowiednim poziomie dekompozycji obiektu,
- uzyskanie informacji diagnostycznej w odpowiednim zakresie oceny stanu obiektu (kontrola stanu, lokalizacja uszkodzeń).
- odpowiednią zmienność wartości sygnałów diagnostycznych w czasie eksploatacji obiektu,

Efektom działania w procesie wnioskowania jest uzyskanie zbioru symptomów (objawów) stanu obiektu technicznego. Zbiór ten określa przynależność mierzonych sygnałów diagnostycznych do pewnych określonych przedziałów. Wybór właściwości obiektu (sygnałów diagnostycznych) oraz określenie ich liczby i szerokości przedziałów dokonuje się na etapie opracowania diagnostycznego. Wymaga to znajomości właściwości struktur funkcjonalnych i konstrukcyjnych obiektu określanych w modelu funkcjonalno-diagnostycznym.

3.2 Model funkcjonalno-diagnostyczny i jego dekompozycja

Na potrzeby organizacji procesu diagnozowania obiekt techniczny najczęściej przedstawiany jest w postaci modelu funkcjonalno-diagnostycznego. W takim modelu obiekt o wielopoziomowej strukturze wewnętrznej jest obiektem złożonym dowolnej klasy. Należy jednak przyjąć warunek, że w wyznaczonych punktach struktury wewnętrznej występują sygnały pomiarowe (analogowe lub fizyczne), którym przypisane są cechy sygnałów diagnostycznych [64, 73, 119]. Zakładamy również, że przyjęty do badań obiekt techniczny jest naprawialnym obiektem z wymaganym dla niego krótkim czasem przestoju. Opracowując model funkcjonalno-diagnostyczny

takiej klasy obiektu dokonujemy podziału jego struktury wewnętrznej na cztery poziomy struktury obsługowej, a mianowicie: poziom pierwszy - obiekt O, poziom drugi - zespoły funkcjonalne E_i w obiekcie, poziom trzeci - podzespoły e_j w każdym zespole E_i i poziom czwarty - elementy podstawowe $e_{i,j}$ w każdym podzespole obiektu. Dokonując takiego podziału struktury obiektu uzyskuje się zbiór elementów podstawowych $\{e_{i,j}\}$.

Powyższy sposób podziału struktury wewnętrznej obiektu jednoznacznie opisuje reguła diagnostyczna R_{d1} , którą zastosowano do podziału struktury wewnętrznej obiektu do poziomu elementu podstawowego. Regułę tą przedstawiono w postaci zależności:

$$R_{d1}: \{O\} \Rightarrow \{E_i\} \Rightarrow \{e_j\} \Rightarrow \{e_{i,j}\}; \text{gdzie } i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J} \quad (3.1)$$

gdzie: R_{d1} – pierwsza reguła diagnostyczna, O – obiekt, E_i – i-ty zespół funkcjonalny, e_j – j-ty podzespół funkcjonalny, $e_{i,j}$ – j-ty element podstawowy w i-tym zespole obiektu

Pierwszy poziom struktury obsługowej obiektu stanowi sam obiekt {O} i jest on zbiorem zespołów funkcjonalnych $\{E_i\}$. Zespoły funkcjonalne obiektu stanowią drugi poziom struktury obsługowej obiektu, a każdy z nich jest zbiorem podzespołów obsługowych $\{e_j\}$. Podzespoły w zespołach stanowią trzeci poziom struktury obsługowej obiektu. Najniższy czwarty poziom struktury stanowi zbiór elementów podstawowych $\{e_{i,j}\}$. Każdy podzespół obsługowy składa się z elementów podstawowych, które są najmniejszym i niepodzielnym elementem funkcjonalnym w strukturze obiektu. Przyjmuje się, że taki element podstawowy wypracowuje swój sygnał wyjściowy dalej nazywany sygnałem pomiarowym lub sygnałem diagnostycznym. W przypadku, gdy element wypracowuje więcej niż jeden sygnał wyjściowy, to wówczas wyznaczany jest tylko jeden sygnał uogólniony, który najbardziej odzwierciedla własności użytkowe (diagnostyczne, niezawodnościowe itp.) danego elementu.

Zbiór zespołów funkcjonalnych w drugiej warstwie obsługowej wyznaczamy na podstawie zależności:

$$R_{d2}: \{O\} \Rightarrow \{E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_I\} \Rightarrow \{E_i\}; \text{gdzie } i = \overline{1, I} \quad (3.2)$$

gdzie: R_{d2} – druga reguła diagnostyczna, O – obiekt, E_i – i-ty zespół funkcjonalny

Dysponując wyznaczonym zbiorem zespołów funkcjonalnych w kolejnym kroku podziału struktury obiektu, dokonuje się dekompozycji w celu uzyskania zbioru podsystemów funkcjonalnych według zależności:

$$R_{d3}: \{E_i\} \Rightarrow \{e_1, e_2, \dots, e_j, \dots, e_J\} \Rightarrow \{e_j\}; \text{gdzie } i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J} \quad (3.3)$$

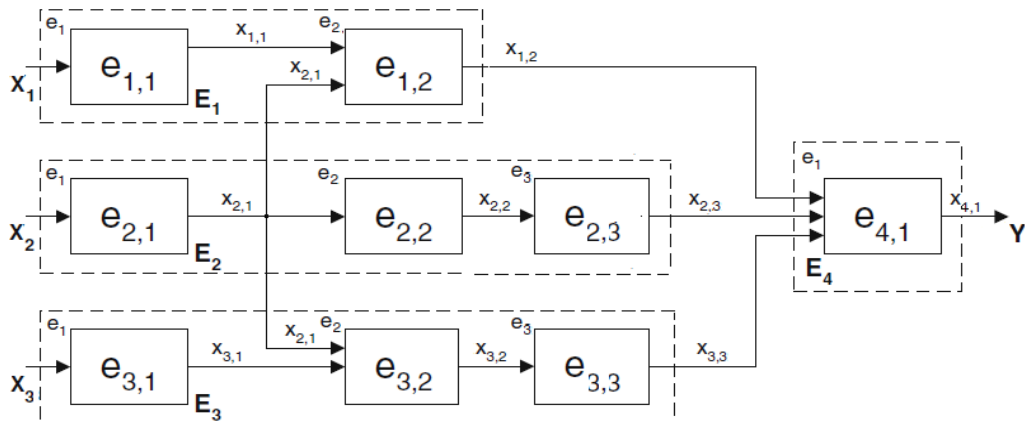
gdzie: R_{d3} – trzecia reguła diagnostyczna, E_i – i-ty zespół funkcjonalny, e_j – j-ty podzespół funkcjonalny

Ostatnim krokiem podziału struktury obiektu jest wyznaczenie w każdym podzespole funkcjonalnym uzyskanym z reguły R_{d3} zbioru elementów podstawowych $\{e_{i,j}\}$. Podział ten realizowany jest na podstawie zależności:

$$R_{d4}: \{E_i\} \Rightarrow \{e_j\} \Rightarrow \{e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{i,J}\} \Rightarrow \{e_{i,j}\}; \text{gdzie } i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J} \quad (3.4)$$

gdzie: R_{d4} – czwarta reguła diagnostyczna, e_j – j-ty podzespół funkcjonalny, $e_{i,j}$ – j-ty element podstawowy w i-tym zespole funkcjonalnym

Wykorzystując reguły R_{d2-d4} (3.2-3.4) możemy w prosty sposób dokonać dekompozycji złożonego obiektu technicznego na cztery poziomy struktury usługowej.



Rys. 3.1. Model funkcjonalno-diagnostyczny obiektu technicznego

gdzie: E_i – struktura i-tego zespołu funkcjonalnego, e_j – j-ty podzespół funkcjonalny, $e_{i,j}$ – j-ty element podstawowy w i-tym zespole obiektu, $X_{i,j}$ – sygnał diagnostyczny na wyjściu j-tego elementu podstawowego, Y – wyjściowy sygnał obiektu

Przedstawiona na rysunku 3.1 przykładowa struktura funkcjonalno-diagnostyczna obiektu składa się z czterech zespołów funkcjonalnych $\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$ określonych na poziomie drugim. Każdy z tych zespołów posiada wydzielone podzespoły e_j tworząc

trzeci poziom podziału struktury obiektu.. Zespoły funkcjonalne mogą zawierać dowolną liczbę podzespołów i tak np. zespoły E_2 i E_3 posiadają trzy podzespoły $\{e_1, e_2, e_3\}$, zespół E_1 dwa podzespoły $\{e_1, e_2\}$, natomiast zespół E_4 tylko jeden $\{e_1\}$. Wszystkie podzespoły zawierają na czwartym poziomie pojedyncze elementy podstawowe $e_{i,j}$, w których występują sygnały diagnostyczne. Tak opracowany model pozwala przejść do analizy funkcjonalno-diagnostycznej w celu wyznaczenia stanu obiektu [8].

Wykonanie modelu funkcjonalno-diagnostycznego badanych urządzeń jest ważnym narzędziem pomocniczym nie tylko w procesie diagnozowania ale również przy budowaniu ekspertowych baz wiedzy [4, 48, 53]. Dlatego wiarygodne schematy funkcjonalno-diagnostyczne urządzeń, dla których są budowane muszą zawierać możliwie jak najwięcej niezbędnych informacji. Do poszukiwanych informacji podczas opracowywania takiego schematu należą między innymi: relacje między elementami funkcjonalnymi, połączenia oraz zawiązki funkcjonalno-diagnostyczne, miejsce wypracowania określonego sygnału diagnostycznego oraz jego współzależność z innymi sygnałami w strukturze wewnętrznej obiektu. Dodatkowo tworząc taki model należy posiadać następujące informacje dotyczące [8]:

- Obiektu określającego nazwę badanego (opisywanego) urządzenia, chodzi także o miejsce przypisane do danego elementu (modułu) właściwego faktu,
- Parametru oznaczającego wielkość liczbową danego sygnału diagnostycznego, która jest opisywana wraz z podaniem przedziału zmian dopuszczalnych i granicznych tego sygnału,
- Kierunku wskazującego drogę (tor) danego sygnału na schemacie funkcjonalnym urządzenia od punktu (miejsca) jego wypracowania do punktu końcowego,
- Bloku lub nazwy określającego „numer - adres” elementu funkcjonalnego (modułu), który wypracowuje dany sygnał diagnostyczny,
- Sygnału wskazującego czy dany sygnał diagnostyczny jest typu pomiarowego, w tym analogowy lub cyfrowy.

Przyjęty w pracy podział struktury wewnętrznej określa jednoznacznie głębokość wnikania w tę strukturę. Taki podział uważa się za wystarczający, jeżeli w strukturze obiektu wyróżnimy element podstawowy. Jednak w przypadku wystąpienia obiektów o dużym stopniu złożoności, dalsze poziomy podziału możemy uzyskać poprzez rozpatrzenie określonego elementu podstawowego (modułu) jako oddzielnego obiektu.

Takie założenie będzie prawdziwe tylko w przypadku, gdy w punktach struktury wewnętrznej nowego obiektu wystąpią sygnały diagnostyczne.

3.3 Wyznaczanie zbioru informacji diagnostycznej

Najbardziej rozpowszechnioną w praktyce i dogodną formą przedstawienia obiektu w procesie opracowania diagnostycznego jest jego model funkcjonalno-diagnostyczny. Wyznaczony w ten sposób zbiór jego elementów $\{e_{i,j}\}$ jest podstawą do zestawienia w postaci tablicy zbiorów sygnałów diagnostycznych i nominalnych (wzorcowych) [32, 46]. Dla przykładowej struktury obiektu przedstawionej na rysunku 3.1 zbiór opracowanej informacji diagnostycznej zawarto w tabeli 3.1, a zbiór informacji wzorcowej w tabeli 3.2. Wystąpienie symbolu \emptyset jako dopełnienia wymiaru macierzy, określa się brak podsystemu i występujących w nich elementów podstawowych w rozpatrywanym zespole funkcjonalnym.

Tabela 3.1. Zestawienie sygnałów diagnostycznych obiektu przedstawionego na rysunku 3.1

Obiekt	Zespoły obiektu E_i	Wektor sygnałów diagnostycznych $[X(e_{i,j})]$		
		e_1	e_2	e_3
0	E_1	$X(e_{1,1})$	$X(e_{1,2})$	\emptyset
	E_2	$X(e_{2,1})$	$X(e_{2,2})$	$X(e_{2,3})$
	E_3	$X(e_{3,1})$	$X(e_{3,2})$	$X(e_{3,3})$
	E_4	$X(e_{4,1})$	\emptyset	\emptyset

gdzie: \emptyset – symbol dopełnienia

Tabela 3.2. Zestawienie wzorcowych sygnałów obiektu przedstawionego na rysunku 3.1

Obiekt	Zespoły obiektu E_i	Wektor wzorcowych sygnałów diagnostycznych $[X_w(e_{i,j})]$		
		e_1	e_2	e_3
0	E_1	$X_w(e_{1,1})$	$X_w(e_{1,2})$	\emptyset
	E_2	$X_w(e_{2,1})$	$X_w(e_{2,2})$	$X_w(e_{2,3})$
	E_3	$X_w(e_{3,1})$	$X_w(e_{3,2})$	$X_w(e_{3,3})$
	E_4	$X_w(e_{4,1})$	\emptyset	\emptyset

gdzie: \emptyset – symbol dopełnienia

Przebieg procesu diagnozowania jest realizacją zadania porównywania obrazu sygnału diagnostycznego z obrazem jego sygnału wzorcowego. W tym celu wygodnie jest przedstawić obrazy porównywanych sygnałów w postaci wektorowej. Postać

analityczną równania, opisującego proces diagnozowania wykonywany metodą porównywania sygnałów z ich wzorcem, przedstawiono w postaci zależności:

$$\forall_{e_{i,j} \in \{E_i\}} \exists_{X(e_{i,j}) \in X} (X(e_{i,j}) \mapsto X_w(e_{i,j})) \Rightarrow D_i(\varepsilon(e_{i,j})) \quad (3.5)$$

gdzie: $X_{(i,j)}$ – sygnał diagnostyczny j-tego elementu podstawowego w i-tym zespole funkcjonalnym, $X_w(e_{i,j})$ – sygnał wzorcowy j-tego elementu podstawowego w i-tym zespole funkcjonalnym, $D_i(\varepsilon(e_{i,j}))$ – wynik sprawdzenia j-tego elementu podstawowego w i-tym zespole funkcjonalnym

W metodzie diagnozowania przedstawionej w zależności (3.5) możemy określić, że na wyjściu każdego j-tego elementu $e_{i,j}$, znajdującego się w i-tym zespole funkcjonalnym istnieje sygnał diagnostyczny $X(e_{i,j})$, który jest porównywany z właściwym mu sygnałem wzorcowym $X_w(e_{i,j})$. W efekcie tego działania otrzymujemy wynik sprawdzenia $D(\varepsilon(e_{i,j}))$ j-tego elementu podstawowego w i-tym zespole funkcjonalnym. Jeżeli w dalszym etapie diagnozowania każdemu uzyskanemu wynikowi sprawdzenia diagnostycznego przypisze się określoną wartość logiczną stanu, wówczas takie sprawdzenie diagnostyczne można przedstawić w tablicy diagnoz (tablicy stanów). Efektem takiego porównywania sygnałów jest wypracowanie przez system diagnostyczny decyzji do jakiego z czterech wyróżnionych stanów (3, 2, 1, 0) zakwalifikować dany element obiektu. Przypisanie określonego stanu do elementów podstawowych determinuje stan zespołów funkcjonalnych oraz samego obiektu, według zależności opisanych w procesie wnioskowania.

Tabela 3.3. Zestawienie stanów obiektu przedstawionego na rysunku 3.1

Stan Obiektu	Stan Zespołu	Wektor stanów elementów podstawowych ($e_{i,j}$)		
		$\varepsilon(e_1)$	$\varepsilon(e_2)$	$\varepsilon(e_3)$
$W(\varepsilon(O))$	$W(\varepsilon(E_1))$	$W(\varepsilon(e_{1,1}))$	$W(\varepsilon(e_{1,2}))$	\emptyset
	$W(\varepsilon(E_2))$	$W(\varepsilon(e_{2,1}))$	$W(\varepsilon(e_{2,2}))$	$W(\varepsilon(e_{2,3}))$
	$W(\varepsilon(E_3))$	$W(\varepsilon(e_{3,1}))$	$W(\varepsilon(e_{3,2}))$	$W(\varepsilon(e_{3,3}))$
		$W(\varepsilon(e_{4,1}))$	\emptyset	\emptyset

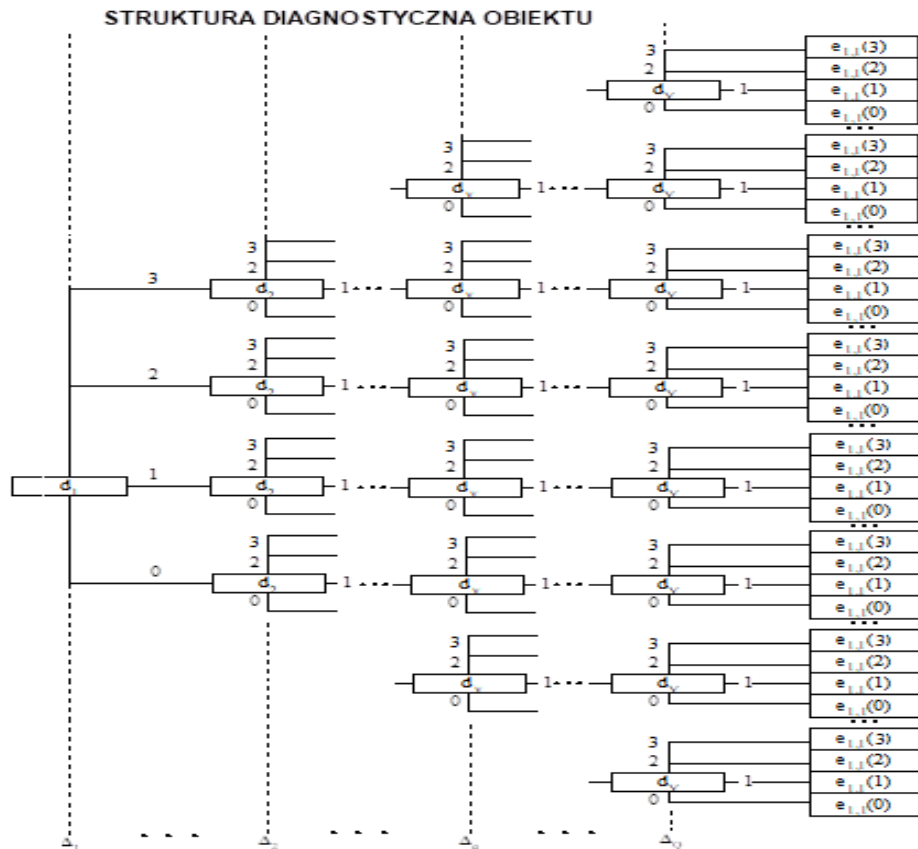
gdzie: $W(\varepsilon(O))$ – stan obiektu, $W(\varepsilon(E_1))$ – stan i-tego zespołu funkcjonalnego obiektu, $W(\varepsilon(e_{i,j}))$ – stan j-tego elementu podstawowego znajdującego się w i-tym zespole funkcjonalnym, \emptyset – symbol dopełnienia

Przedstawione w tabeli 3.3 zestawienie stanów dla przykładowego schematu funkcjonalno-diagnostycznego z rysunku 3.2 określa diagnostyczną bazę wiedzy dla tego obiektu.

3.4 Zastosowanie drzewa decyzyjnego w torze sprawdzeń diagnostycznych

Sformułowanie diagnozy o stanie obiektu możliwe jest jedynie na podstawie przeprowadzonych badań polegających na realizacji określonego zbioru sprawdzeń. Poprzez sprawdzenie rozumiemy ciąg operacji służących zbadaniu cechy obiektu i polegających na skontrolowaniu jej wartości i porównaniu z wzorcem (przedziałem dopuszczalnym). W przypadku kiedy sprawdzenie obejmuje pojedynczy element to nazywamy je cząstkowym, w przeciwnym razie mamy do czynienia z torem sprawdzeń [54].

Wyniki sprawdzeń D_i wpisane w macierz diagnostyczną można przedstawić graficznie w postaci drzewa decyzyjnego zwanego schematem sprawdzeń. Przykładowy schemat sprawdzeń, który przedstawiono na rysunku 3.2, stanowi graficzną reprezentację macierzy diagnostycznej. Węzłom schematu przyporządkowano sprawdzenia, natomiast gałęzie wychodzące z węzła odpowiadają wynikom sprawdzeń.



Rys. 3.2. Schemat sprawdzeń

W wyniku wykonania i -sprawdzeń $i = \overline{1, I}$ zbiór wszystkich elementów podstawowych obiektu O podzielony został na $e_{i,j}$ (gdzie: $i = \overline{1, I}$; $j = \overline{1, J}$) podzbiorów jednoelementowych, tzn. zlokalizowano wszystkie niezdatne lub nie w pełni zdatne elementy $e_{i,j}$. Gałąź zakończona zbiorem pustym oznaczona została symbolem \emptyset .

Każda gałąź sprawdzenia odpowiada jednemu wzorowi niezdatności, a zbiór wszystkich wzorów niezdatności i niepełnych zdatności stanowi słownik niezdatności diagnozowanego obiektu [47].

Poszczególne poziomy $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_q, \dots, \Delta_Q$ schematu sprawdzeń, przedstawionego graficznie na rysunku 3.2. nazwano poziomami decyzyjnymi. Wyznaczony zbiór sprawdzeń dostępnych dogodnie jest przedstawić w postaci tablicy sprawdzeń (tabela 3.5. Tablica sprawdzeń zawiera i -tą liczbę wierszy oraz wydzieloną część posiadającą $(2 \times j)$ kolumn, Wartości wyrazów tablicy sprawdzeń określamy w następujący sposób:

- na przecięciu kolumny odpowiadającej stanowi niezdatności $\varepsilon(e_j) = 0$ elementu e_j i wiersza odpowiadającego sprawdzeniu d_i , wpisujemy wynik tego sprawdzenia:

$$\varepsilon(e_j) = 0, \quad d_j = \begin{cases} D_i = 0, & \text{gdy } >e_j < d_i \\ D_i = 3, & \text{gdy } \geq e_j \leq d_i \end{cases} \quad (3.6)$$

- na przecięciu kolumny odpowiadającej stanowi krytycznej zdatności $\varepsilon(e_j) = 1$ elementu e_j i wiersza odpowiadającego sprawdzeniu d_i , wpisujemy wynik tego sprawdzenia:

$$\varepsilon(e_j) = 1, \quad d_j = \begin{cases} D_i = 1, & \text{gdy } >e_j < d_i \\ D_i = 3, & \text{gdy } \geq e_j \leq d_i \end{cases} \quad (3.7)$$

- na przecięciu kolumny odpowiadającej stanowi niepełnej zdatności $\varepsilon(e_j) = 2$ elementu e_j i wiersza odpowiadającego sprawdzeniu d_i , wpisać należy wynik tego sprawdzenia, tzn

$$\varepsilon(e_j) = 2, \quad d_j = \begin{cases} D_i = 2, & \text{gdy } >e_j < d_i \\ D_i = 3, & \text{gdy } \geq e_j \leq d_i \end{cases} \quad (3.8)$$

gdzie: $>e_j < d_i$ – element e_j objęty sprawdzeniem d_i ; $\geq e_j \leq d_i$ – element e_j nie objęty sprawdzeniem d_i , przy czym:

$$\begin{aligned}
D_i(\varepsilon(e_j) = 0) = 0 &\equiv D_i^0 \\
D_i(\varepsilon(e_j) = 1) = 1 &\equiv D_i^1 \\
D_i(\varepsilon(e_j) = 2) = 2 &\equiv D_i^2 \\
D_i(\varepsilon(e_j) = 3) = 3 &\equiv D_i^3
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

Zlokalizowanie wszystkich niezdatności, krytycznych lub niepełnych zdatności na poziomie Δ_q , gdzie: $q = \overline{1, Q}$ świadczy o tym, że zbiór wszystkich elementów obiektu podzielony został na podzbiory tylko jednoelementowe, a wykonywanie dalszych sprawdzeń jest niecelowe, bowiem są to sprawdzenia nadmiarowe.

Doświadczenie diagnostyczne zaprezentowane w pracach [138] wykazuje, że permutacja sprawdzeń decyduje o tym, na którym poziomie decyzyjnym zostaną zlokalizowane wszystkie niezdatne, bądź nie w pełni zdatne elementy podstawowe diagnozowanego obiektu. Stąd istotne znaczenie, w procesie lokalizacji niezdatności posiada optymalizacja zbioru sprawdzeń w schemacie sprawdzeń. Polega ona na takim ustawieniu kolejności sprawdzeń na poszczególnych poziomach decyzyjnych, aby uzyskać zlokalizowanie wszystkich niezdatnych, bądź nie w pełni zdatnych elementów podstawowych przy możliwie najmniejszej liczbie niezbędnych sprawdzeń.

Tabela 3.4. Tablica sprawdzeń obiektu

Wynik D_i sprawdzenia d_i				
d_1	...	d_i	...	d_l
$D_1(\varepsilon_1^0)$	...	$D_i(\varepsilon_1^0)$	...	$D_l(\varepsilon_1^0)$
	
$D_1(\varepsilon_j^0)$	...	$D_i(\varepsilon_j^0)$	...	$D_l(\varepsilon_j^0)$
	
$D_1(\varepsilon_l^0)$	...	$D_i(\varepsilon_l^0)$	...	$D_l(\varepsilon_l^0)$
$D_1(\varepsilon_{zd})$	...	$D_i(\varepsilon_{zd})$	...	$D_l(\varepsilon_{zd})$

gdzie: $D_i(\varepsilon(e_j^0))$ – wynik sprawdzenia j -tego elementu podstawowego

Jednak, w celu wybrania optymalnej permutacji sprawdzeń, należałoby drogą kolejnych prób wykonać wszystkie możliwe ustawienia sprawdzeń. Jest to jednak zadanie niemal niewykonalne, nawet dla obiektów o umiarkowanym stopniu złożoności strukturalnej. Biorąc pod uwagę powyższe ustalenia, w pracy zaproponowano optymalizowanie zbioru sprawdzeń z głębokością wnikania w strukturę obiektu, aż do elementu podstawowego (modułu) za pomocą macierzy diagnostycznej przedstawionej

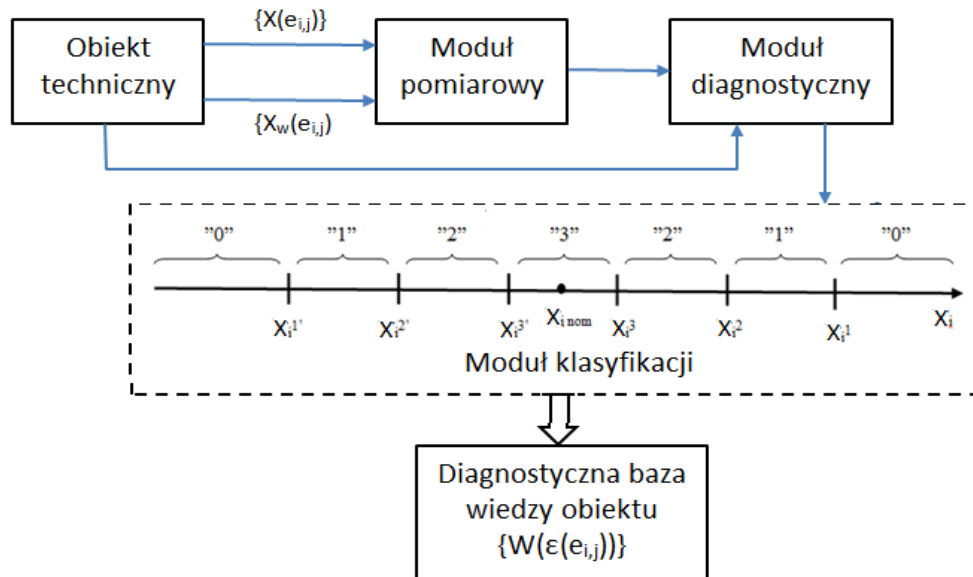
w tabeli 3.4. Natomiast schemat sprawdzeń z rysunku 3.3 wykorzystywano tylko w celu zobrazowania tego procesu dla niewielkiej liczby sprawdzeń [5-7].

3.5 Klasyfikacja stanów obiektu w procesie wnioskowania

Celem diagnozowania obiektu technicznego jest rozpoznanie jego stanu w przyjętej przez badającego logice wartościowości oceny stanów. Realizowany jest więc proces decyzyjny wnioskowania (klasyfikowania) stanów zgodnie z progiem decyzyjnym przyjętym w danej metodzie. Zanim opisane zostaną reguły klasyfikacji wyznaczające stany dla poszczególnych elementów obiektu należy najpierw zdefiniować model procesu wnioskowania dla logiki czterowartościowej przedstawionej w rozdziale drugim.

3.5.1 Model procesu wnioskowania w czterowartościowej ocenie stanu

Na podstawie rozpoznanych stanów wartościom funkcji wyjściowej wyznaczonych w procesie klasyfikowania przyporządkowuje się właściwe klasy stanów [50, 59]. Schemat wnioskowania w procesie diagnostycznym dla czterowartościowej oceny stanu obiektu przedstawiono na rysunku 3.3. Dla wprowadzonych na wejściu wektorów sygnałów pomiarowych $[X_i]$ i sygnałów wzorcowych $[X_{(w)i}]$ otrzymujemy diagnostyczną bazę wiedzy obiektu $\{W(\varepsilon(e_{i,1}))\}$ opisaną w tabeli 3.3.



Rys. 3.3. Schemat wnioskowania w procesie diagnostycznym w oparciu o czterowartościową ocenę stanu

gdzie: $\{X(e_{i,j})\}$ – zbiór sygnałów diagnostycznych, $\{X_w(e_{i,j})\}$ – zbiór sygnałów nominalnych

Proces wnioskowania realizowany w module klasyfikacji dokonuje rozpoznania stanu nie tylko obiektu ale i jego składowych elementów zgodnie z przyjętą wcześniej dekompozycją modelu funkcjonalno-diagnostycznego. Dlatego ocenie stanu poddajemy zbiory elementów składowych struktury obiektu tj. zespoły funkcjonalne $\{E_i\}$ i elementy podstawowe $\{e_{i,j}\}$. Implikacje określającą stan obiektu technicznego od jego zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych dla czterowartościowej oceny stanów przedstawia następująca zależność: [60]

$$\{W(\varepsilon(e_{i,j}))\} \Rightarrow \{W(\varepsilon(E_i))\} \Rightarrow W(\varepsilon(O)) = \{3,2,1,0\} \quad (3.10)$$

gdzie: $\{W(\varepsilon(e_{i,j}))\}$ – zbiór wartości porównania sygnału dla j-tego elementu w i-tym zespole, $\{W(\varepsilon(E_i))\}$ – zbiór wartości porównania w i-tym zespole obiektu, $W(\varepsilon(O))$ – wartość wynikowa określająca stan obiektu

Zależność (3.10) wskazuje nie tylko kierunek realizacji procesu wnioskowania ale określa również trzy etapy niezbędne do określenia oceny stanu obiektu. W pierwszej kolejności wymagane jest wyznaczenie stanów dla wszystkich elementów podstawowych, następnie zespołów funkcjonalnych aż do wyznaczenia stanu obiektu.

3.5.2 Wyznaczanie stanu elementów podstawowych obiektu

Całość problematyki przetwarzania informacji dla elementów podstawowych odbywa się w D-wymiarowej przestrzeni diagnostycznej opisanej elementarnymi wektorami sygnałów pomiarowych $[X_i]$ i sygnałów wzorcowych $[X_{(w)i}]$. Wynika z tego, że dla każdego j-tego elementu występującego w i-tym zespole obiektu istnieje obraz jego sygnału diagnostycznego $[X(e_{i,j})]$ zapisanego w postaci wektorowej, który jest porównywany z jego wektorowym obrazem wzorcowym. Postać analityczną równania diagnostycznego, opisującego proces diagnozowania elementów podstawowych wykonywanych metodą porównania sygnałów z ich wzorcem przedstawiono w postaci zależności [68].

$$\forall_{e_{i,j} \in \{E_i\}} \exists_{X(e_{i,j}) \in X} (X(e_{i,j}) \mapsto X_{(w)}(e_{i,j})) \Rightarrow W(\varepsilon(e_{i,j})) \quad (3.11)$$

gdzie: $X(e_{i,j})$ – sygnał diagnostyczny na wyjściu j-tego elementu w i-tym zespole,

$X_{(w)}(e_{i,j})$ – wzorcowy sygnał diagnostyczny dla j-tego elementu w i-tym zespole,

$W(\varepsilon(e_{i,j}))$ – wartość wynikowa porównania sygnału dla j-tego elementu w i-tym zespole obiektu

Efektom działania wynikającym z zależności (3.11) jest wynik sprawdzenia $D(\varepsilon(e_{i,j}))$ przypisujący określoną wartość logiczną stanu j -tego elementu podstawowego w i -tym zespole funkcjonalnym umieszczonym w tabeli stanów.

Zaprezentowana w pracy metoda porównywania wektorów jest w sensie ogólnym reprezentacją szerszej teorii nazwanej w literaturze teorią rozpoznawania obrazów [107]. W teorii tej większość stosowanych metod określających miary podobieństwa SBM (ang. Similarity Based Method), wywodzi się z miar odległościowych, których przekształcanie realizowane jest za pomocą wyznaczonej (poszukiwanej) funkcji ważącej reprezentującej miarę podobieństwa [122]. Zastosowane miary przekształcania informacji w procesie diagnostycznym mogą być jednorodne lub niejednorodne. Miara metryki wektorów odległości jest miarą jednorodną, wtedy gdy wszystkie cechy wektorów sygnałów przestrzeni wejściowej są przedstawione przez jednakowo opisujące je funkcje. W pracy zastosowano tylko jednorodne miary wektora odległości w postaci miar podobieństwa wektorów sygnałów wejściowych do ich wzorców Ponadto przyjęto metrykę Euklidesową dla danych ciągłych, w której parametry podlegające optymalizacji są centralnie takie same w całej przestrzeni albo lokalnie różne dla każdego wektora referencyjnego [104]. Najczęściej stosowaną metryką odległości jest miara Minkowskiego z parametrem adaptacyjnym σ , określana poniższą zależnością [83, 103]:

$$D_M(X_i, X_{(w)i}, \sigma) = \left(\sum_{i=1}^N |X_i - X_{(w)i}|^\sigma \right)^{1/\sigma} \quad (3.12)$$

gdzie: $D_M(X_i, X_{(w)i}, \sigma)$ – odchylenie standardowe wektora metryki sygnału, σ – parametr adaptacyjny ($\sigma = 2$)

Na jej podstawie obliczane są miary metryki podobieństwa zgodności wektora sygnałów z wektorem wzorca według zależności:

$$\Delta X_{(n)i} = X_i - X_{(w)i} \quad (3.13)$$

gdzie: $\Delta X_{(n)i}$ – wektor metryki odległości i -tego sygnału, X_i – i -ty sygnał diagnostyczny, $X_{(w)i}$ – i -ty sygnał wzorcowy

Wykorzystując zależności (3.12) i (3.13) oraz przyjmując parametr adaptacyjny $\sigma = 2$ wyznaczamy miarę Euklidesową metryki odległości. Dodatkowo w celu zniwelowania zbyt dużych początkowych dysproporcji pomiędzy wartościami w poszczególnych wymiarach dokonujemy normalizacji danych w taki sposób, aby po

przekształceniu wartości mieściły się w przedziale $[0,1]$. Standaryzowanie metryk wartości sygnałów diagnostycznych realizowane jest zgodnie z zależnością:

$$\Delta X_{(n)i} = \frac{X_i - X_{(w)i}}{D_{Mi}} \quad (3.14)$$

gdzie: $\Delta X_{(n)i}$ – unormowany wektor metryki odległości i-tego sygnału, X_i – i-ty sygnał diagnostyczny, $X_{(w)i}$ – i-ty sygnał wzorcowy, D_{Mi} - odchylenie standardowe i-tego wektora metryki sygnału

Obliczone z zależności (3.14) unormowane wartości wszystkich wektorów wejściowych określane są jako współczynniki wag $v_{i,j} = [v_{1,1}, v_{1,2}, \dots, v_{1,J}]$, gdzie $i = 1, I$; $j = 1, J$ i $v_{i,j} \in [0,1]$. W ten sposób w wyniku przekształcenia informacji diagnostycznej wypracowany jest sygnał w postaci zależności:

$$f_i(x, v) = \sum_{i=1}^K v_{i,j} \cdot X_i \quad (3.15)$$

gdzie: $f_i(x, v)$ – wartość funkcji odległości dla i-tego sygnału diagnostycznego, X_i - i-ty sygnał diagnostyczny, $v_{i,j}$ – współczynnik wag unormowanej wartości sygnału

Ważną kategorią w określaniu funkcji odległości w metodach SBM wyróżniamy miary probabilistyczne, w których obliczane są dystrybuanty unormowanej metryki odległości wektora sygnału od jego wzorca $F(\Delta X_{(n)i})$ [22]. W celu wyznaczenia funkcji hiperpłaszczyzny obliczana jest graniczna wartość dystrybuanty unormowanego wektora metryki odległości cechy sygnału $F(\Delta X_i)_G$ dla zmiennej losowej metryki ($\Delta X_{(n)i} = 0$),, gdzie $(F(\Delta X_i)_G) = 1$. Wyznaczenie hiperpłaszczyzny χ dla granicznej wartości dystrybuanty $F(\Delta X_i)_G$ i metryk odległości z funkcją Gaussa stanowi granicę decyzji między klasami stanów. Płaszczyzna ta jest równoległa do dwóch punktów wyznaczonych progiem podejmowania decyzji, Które leżą na prostej prostopadłej do hiperpłaszczyzny χ .

W dalszym etapie przetwarzania informacji wyznaczone są wartości współczynników niezgodności podobieństwa $\rho_{i,j}$ dystrybuanty wektora sygnału wejściowego do jego wektora wzorcowego. na podstawie zależności

$$\rho_{i,j} = |F(\Delta X_{(n)i}) - F(\Delta X_i)_G| \quad (3.16)$$

gdzie: $\rho_{i,j}$ współczynnik niezgodności podobieństwa wektorów cech badanego sygnału i wektora wzorcowego, $F(\Delta X_{(n)i})$ – wyznaczana wartość dystrybuanty dla rozkładu normalnego unormowanego wektora metryki odległości cechy sygnału,

$F(\Delta X_i)_G$ – graniczna wartość dystrybuanty dla rozkładu normalnego unormowanego wektora metryki odległości cechy sygnału

Po wyznaczeniu współczynników niezgodności podobieństwa wektora sygnału wejściowego do jego wektora wzorcowego $\rho_{i,j}$ obliczany jest współczynnik zgodności podobieństwa wektorów $\omega_{i,j}$ na podstawie zależności:

$$\omega_{i,j} = 1 - \rho_{i,j} \quad (3.17)$$

gdzie: $\omega_{i,j}$ współczynnik zgodności podobieństwa wektorów cech badanego sygnału i wektora wzorcowego (współczynnik wagowy).

Końcowym etapem przetwarzania informacji dotyczącej elementów podstawowych jest proces wyznaczania funkcji wyjścia określającej decyzje diagnostyczne, efektem których jest zbiór rozpoznanych stanów obiektu. Funkcje wyjścia obliczane są na podstawie zależności:

$$y_i = f \sum_{i=1}^K \omega_{i,j} \cdot X_i \quad (3.18)$$

gdzie: y_i – funkcja wyjścia i-tego sygnału, X_i – i-ty sygnał diagnostyczny, $\omega_{i,j}$ – wagowy współczynnik zgodności podobieństwa wektorów diagnostycznego i wzorcowego.

Na podstawie wyznaczonych w procesie rozpoznania stanów wartościom funkcji wyjściowej w procesie klasyfikowania stanów następuje przyporządkowanie właściwych klas stanów elementów podstawowych w wartościach logiki czterowartościowej [41, 43]. Uwzględniając reguły (2.1-2.4) oraz zależność (3.18) otrzymujemy reguły diagnostyczne poszczególnych klas stanów dla elementów podstawowych.

- **Stan zdatności** – określa przedział zmian nieistotnych, w tym stanie elementu oznaczonym wartością „3” zmiany funkcji wyjściowej y_i mieszczą się w przedziale:

$$R_{wd1}: \forall_{X(e_{i,j}) \in X} X(e_{i,j}) \rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^3 \Rightarrow 3) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^K \omega_{i,j} \cdot X_i \leq \alpha \quad (3.19)$$

gdzie: R_{wd1} – pierwsza reguła wnioskowania diagnostycznego, $\omega_{i,j}$ – współczynnik wagowy określający zgodność podobieństwa dystrybuanty wektora cech sygnału badanego do wektora wzorcowego, α – próg

decyzyjny wyznaczający przedział zmian nieistotnych wartości funkcji wyjściowej

- **Stan niepełnej zdatności** – określa przedział zmian istotnych, w tym stanie elementu oznaczonym wartością „2” zmiany funkcji wyjściowej y_i muszą zawierać się w przedziale:

$$R_{wd2}: \exists_{X(e_{i,j}) \in X} X(e_{i,j}) \rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^2 \Rightarrow 2) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^K \omega_{i,j} \cdot X_i \in (\alpha, \beta) \quad (3.20)$$

gdzie R_{wd2} – druga reguła wnioskowania, β – próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian istotnych wartości funkcji wyjściowej

- **Stan zdatności krytycznej** - określa przedział zmian krytycznych, w tym stanie elementu oznaczonym wartością „1” zmiany funkcji wyjściowej y_i muszą zawierać się w przedziale:

$$R_{wd3}: \exists_{X(e_{i,j}) \in X} X(e_{i,j}) \rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^1 \Rightarrow 1) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^K \omega_{i,j} \cdot X_i \in (\beta, \gamma) \quad (3.21)$$

gdzie R_{wd3} – trzecia reguła wnioskowania, γ – próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian krytycznych wartości funkcji wyjściowej

- **Stan niezdatności** - określa przedział zmian niedopuszczalnych, w tym stanie elementu oznaczonym wartością „0” zmiany funkcji wyjściowej y_i muszą zawierać się w przedziale:

$$R_{wd4}: \exists_{X(e_{i,j}) \in X} X(e_{i,j}) \rightarrow (\varepsilon_i = \varepsilon_i^0 \Rightarrow 0) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^K \omega_{i,j} \cdot X_i > \gamma \quad (3.22)$$

gdzie: R_{wd4} – czwarta reguła wnioskowania, γ – próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian krytycznych wartości funkcji wyjściowej

Zastosowanie reguł (3.19-3.22) pozwala wyznaczyć w module klasyfikacji stan j -tego elementu podstawowego w i -tym zespole funkcjonalnym ze zbioru możliwych stanów w ocenie czterowartościowej $\{3,2,1,0\}$. W szczególnym przypadku, kiedy rozbieżność pomiędzy wektorem sygnału diagnostycznego a jego sygnałem wzorcowym przekracza próg decyzyjny wyznaczający przedział zmian krytycznych γ to element znajduje się w stanie niezdatności (awarii).

3.5.3 Wyznaczanie stanu obiektu i zespołów funkcjonalnych

Mając rozpoznane stany elementów podstawowych wyznaczamy w kolejnym etapie procesu wnioskowania stany zespołów funkcjonalnych oraz stan samego obiektu. W pierwszej kolejności moduł wnioskujący przedstawiony na rysunku. 3.4. wyznacza stan i -tych zespołów funkcjonalnych obiektu $\{E_i\}$ poddając analizie stany j -tych elementów podstawowych $W(\varepsilon(e_{i,j}))$ w danym i -tym zespole obiektu. Reguła wnioskująca do rozpoznawania stanu i -tego zespołu funkcjonalnego określana jest następującą zależnością:

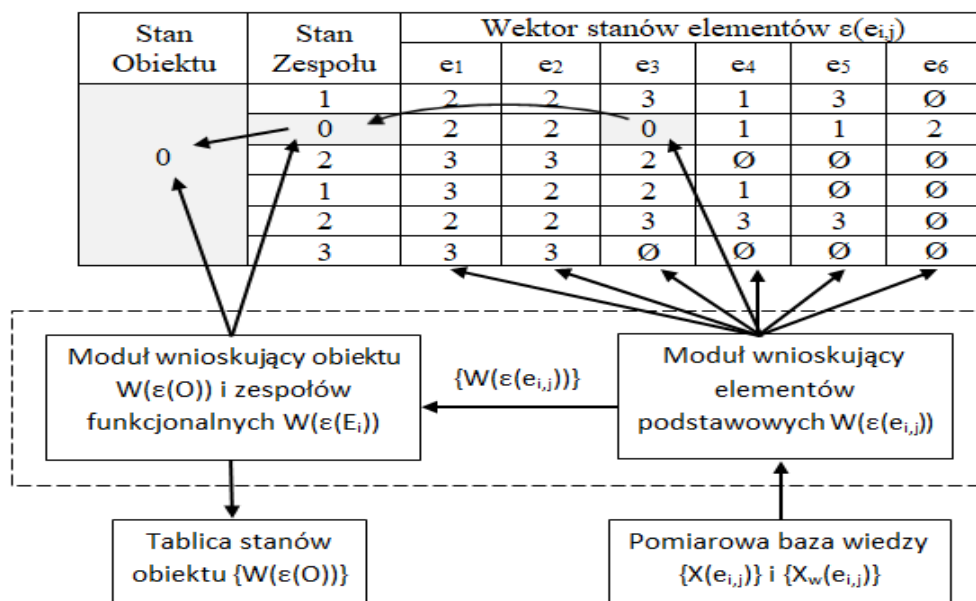
$$W(\varepsilon(E_i)) = \min_{1 \leq j \leq l} (W(\varepsilon(e_{i,j}))) \quad (3.23)$$

gdzie: $W(\varepsilon(E_i))$ – stan i -tego zespołu funkcjonalnego, $W(\varepsilon(e_{i,j}))$ – stan j -tego elementu podstawowego w i -tym zespole funkcjonalnym

Stan diagnozowanego obiektu wyznaczany jest w ostatnim etapie pracy modułu klasyfikacji. Podstawą tego procesu rozpoznania jest wyznaczony zbiór stanów i -tych zespołów funkcjonalnych $W(\varepsilon(E_i))$ o najniższej wartościowości wyznaczonej ze zbioru stanów $\{3,2,1,0\}$. Reguła wnioskująca do rozpoznawania stanu obiektu określana jest następującą zależnością:

$$W(\varepsilon(O)) = \min_{1 \leq i \leq l} (W(\varepsilon(E_i))) \quad (3.24)$$

gdzie: $W(\varepsilon(O))$ stan obiektu wyznaczony w procesie klasyfikacji, $W(\varepsilon(E_i))$ – stan i -tego zespołu funkcjonalnego



Rys. 3.4 Schemat procesu wnioskowania w systemie diagnostycznym z czterowartościową oceną stanu

Istotę rozpoznania stanu obiektu $W(\varepsilon(O))$ na podstawie stanów wyróżnionych w jego strukturze zespołów funkcjonalnych $\{E_i\}$ oraz elementów podstawowych $\{e_{i,j}\}$ opisanych zależnościami (3.23, 3.24) przedstawiono na Rys. 3.4.

Z analizy rysunku 3.4 wynika, że jeżeli jeden z i -tych zespołów funkcjonalnych znajduje się w stanie to obiekt również będzie znajdował się w najniższym stanie. Podobna sytuacja występuje w przypadku zespołu funkcjonalnego, który przyjmuje najniższy stan uzyskany przez jego j -ty element podstawowy. Podsumowując, diagnozowany obiekt przyjmie najniższy stan występujący w j -tym elemencie podstawowym i -tego zespołu funkcjonalnego.

3.6 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale określono etapy procesu diagnostycznego i struktury wewnętrzne modelu funkcjonalno-diagnostycznego oraz występujące między nimi relacje. Dla tak przyjętego modelu wyznaczono reguły dekompozycji struktury wewnętrznej obiektu na cztery poziomy struktury obsługowej, a mianowicie: poziom pierwszy - obiekt O , poziom drugi - zespoły funkcjonalne E_i w obiekcie, poziom trzeci - podzespoły e_j w każdym zespole E_i i poziom czwarty - elementy podstawowe $e_{i,j}$ w każdym podzespole obiektu.

Wyznaczenie poziomów struktury wewnętrznej obiektu umożliwia określenie zbiorów sygnałów diagnostycznych $\{X_i\}$ i nominalnych (wzorcowych) $\{X_{(w)i}\}$ w postaci tabelarycznej. Tak przyjęte rozwiązanie pozwala na swobodne dwukierunkowe przekształcanie danych do struktury hierarchicznej reprezentującej badany obiekt w komputerowym systemie diagnostycznym.

W dalszej części rozdziału opisano przebieg procesu diagnozowania będącego realizacją zadania porównywania obrazu sygnału diagnostycznego z obrazem jego sygnału wzorcowego. Następnie zdefiniowano. postać analityczną równania, opisującego proces diagnozowania wykonywany metodą porównywania sygnałów z ich wzorcem, Efektem takiego porównywania opisanego w postaci tabeli stanów określono wypracowane przez system diagnostyczny decyzje do jakiego z czterech wyróżnionych stanów (3, 2, 1, 0) zakwalifikowano poszczególne elementy obiektu.

Na końcu przedstawiono schemat procesu wnioskowania wraz z określonymi regułami wyznaczania stanu elementów obiektu na różnych poziomach struktury obsługowej. Z reguł tych wynika, że jeżeli jeden z i -tych zespołów funkcjonalnych znajduje się w najniższym stanie to obiekt również będzie znajdował się w najniższym

stanie. Analogicznie sytuacja wygląda dla j -tych elementów w i -tych zespołach funkcjonalnych, co powoduje wyznaczenie stanu obiektu jako stanu elementu z najniższą wartością ze zbioru wszystkich elementów obiektu.

4 Komputerowy system diagnostyczny DIAG 2

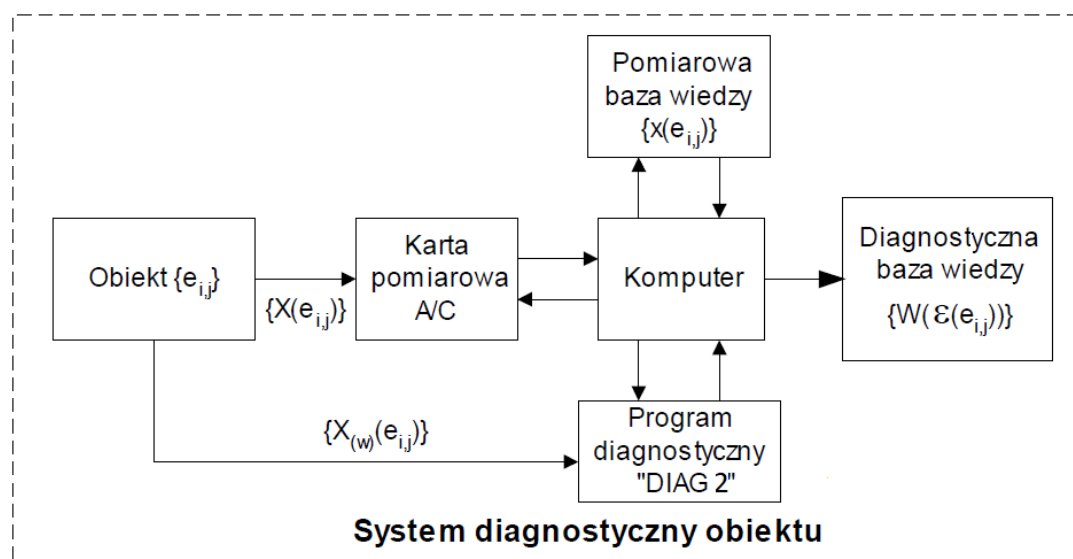
Prowadzone przez autora badania nad wykorzystaniem logiki czterwartościowej w procesie diagnozowania złożonych obiektów technicznych przyczyniły się do powstania autorskiego komputerowego systemu diagnostycznego DIAG 2 [41, 43], będącego rozwinięciem inteligentnego programu DIAG. Jedną z głównych przyczyn napisania od nowa komputerowego programu diagnostycznego oprócz potrzeby wykorzystania wielowartościowej logiki stanów była chęć uzyskania otwartej platformy z możliwością rozbudowy o dodatkowe zadania. Zwiększanie funkcjonalności i integracja o dodatkowe zadania w postaci niezależnych modułów zrealizowane zostało w kierunku inteligentnego komputerowego systemu wspomagającego proces odnowy cech eksploatacyjnych obiektów technicznych [35]. W takim kontekście podczas projektowania systemu starano się osiągnąć jak największy stopień sparametryzowania oraz hermetyczności dla realizowanych zadań. Zanim jednak przejdziemy do szczegółowego omówienia programu DIAG 2, konieczne jest wcześniejsze zdefiniowanie modelu systemu diagnostycznego oraz komponentów wchodzących w jego skład.

4.1 Model systemu diagnostycznego

W każdym użytkowanym obiekcie technicznym poddanym określonym działaniom diagnostycznym, możliwe jest podjęcie czynności naprawczych (odnawiających) dla rozpoznanego stanu pośredniego lub stanu niezdatności. Jeżeli znamy lub możemy określić czas ich wystąpienia, to tym samym wiemy dokładnie w jakim momencie należy obiekt poddać działaniom odnowy. Takie podejście jest rozwiązaniem podstawowego problemu dotyczącego odtwarzania zasobu funkcjonowania obiektu w postaci automatycznego rozpoznawania stanu jego elementów konstrukcyjnych [67, 100].

Strukturę systemu diagnostycznego monitorującego stan procesu technologicznego określa złożony układ rozwiązań technicznych i programowych. Współczesny system diagnostyczny przedstawiony na rysunku 4.1, to nie tylko karta pomiarowa i poprawnie dobrany tor pomiarowy, lecz przede wszystkim narzędzia informatyczne. Do podstawowych komponentów wchodzących w skład komputerowego systemu diagnostycznego generujących informację dotyczącą cech eksploatacyjnych obiektu

technicznego możemy zaliczyć obiekt, kartę pomiarową, program diagnostyczny oraz pomiarową i diagnostyczną bazę wiedzy.



Rys. 4.1. Schemat strukturalny układu diagnostycznego z programem DIAG 2 [41]

4.1.1 Obiekt

Definiowany najczęściej jako zbiór elementów wzajemnie ze sobą powiązanych, stanowiących określoną całość i realizujących określone funkcje. Charakteryzuje się złożoną strukturą wewnętrzną wymagającą wnikania wielopoziomowego w celu wyznaczenia składowych komponentów lub elementów podstawowych. Wewnętrzną strukturę pomiarową badanego obiektu, pozyskujemy w wyniku analizy funkcjonalno-diagnostycznej oraz wykonaniu reguł dekompozycji przedstawionych w zależnościach (3.1-3.4). Efektem tej analizy jest wyznaczenie zbioru elementów obiektu $\{e_{i,j}\}$, w których występują sygnały pomiarowe. W rezultacie na wyjściu uzyskujemy zbiór sygnałów diagnostycznych $\{X(e_{i,j})\}$,

4.1.2 Karta pomiarowa

Określa urządzenie lub jego elementy dokonujące pomiaru zbioru wartości sygnałów diagnostycznych $\{X(e_{i,j})\}$ w badanym obiekcie. Zawiera oprogramowanie w skład którego należy wyspecjalizowany program komputerowy sterujący pracą tej karty, efektem której jest zestawiona w postaci tablicowej pomiarowa baza wiedzy ekspertowej [4]. Dodatkowo, w ramach karty pomiarowej możemy również zaliczyć moduł diagnostyczny opisujący zespół urządzeń zapewniających za pomocą interfejsu pomiarowego dostosowanie zakresu mierzonych sygnałów do poziomu karty pomiarowej, Takie urządzenia realizujące kompleksowe zadania pomiarowe dotyczące

rozdzielczości, dokładności, liczby kanałów i prędkości dla rejestratora danych nazywamy systemami akwizycji danych.

4.1.3 Program diagnostyczny

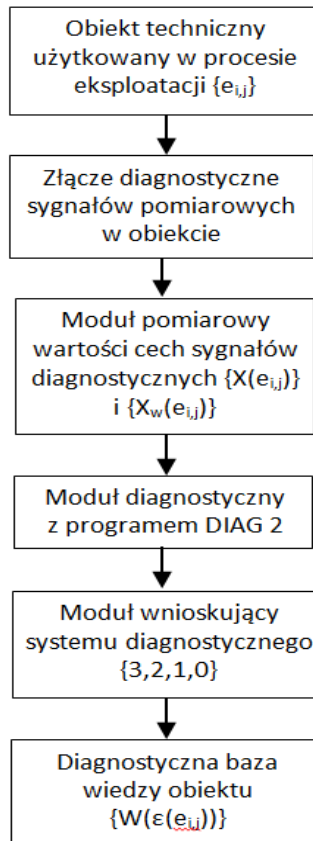
Zawiera głównie specjalistyczne oprogramowanie diagnostyczne wykorzystujące zaawansowane algorytmy do realizacji procesu wnioskowania w logikach wielowartościowych dla $k \geq 2$. Stosowane powszechnie programy komputerowe realizują coraz więcej dodatkowych zadań związanych z procesem diagnostycznym. Do zadań tych możemy zaliczyć działania dotyczące poprawnej rejestracji, przetwarzania i analizy sygnałów oraz wyznaczania na ich podstawie pomiarowej bazy wiedzy $\{X(e_{i,j})\}$. Należy również nadmienić, że w literaturze opisywane programy diagnostyczne są w większości przypadków elementem składowym większych systemów nadzoru i bezpieczeństwa oraz odnowy cech eksploatacyjnych [20, 65, 74]. Wykorzystywana w nich modułowa budowa oraz możliwość zastosowania w sferze programowej coraz bardziej zaawansowanych algorytmów pozwala na tworzenie coraz inteligentniejszych i bardziej autonomicznych systemów diagnostycznych.

4.1.4 Pomiarowa i diagnostyczna baza wiedzy

W każdym z komponentów systemu diagnostycznego realizowane są odpowiednie działania wyznaczające informację wyjściową. Informacja ta, przekazywana jest w odpowiedniej postaci na wejście kolejnego modułu, aż do uzyskania diagnostycznej bazy wiedzy.

Schemat przetwarzania informacji w poszczególnych modułach systemu diagnostycznego z programem DIAG 2 przedstawiono na rysunku 4.2. Przedstawia on kierunek przepływu informacji pomiędzy poszczególnymi komponentami zgodnie z procesem diagnostycznym opisanym w rozdziale 3.

Pomiarowa baza wiedzy wraz ze zbiorem wartości sygnałów nominalnych $\{X_{(w)}(e_{i,j})\}$ podawana jest na wejście modułu wnioskowania programu diagnostycznego. W zależności od ustalonych parametrów klasyfikacji w module tym wyznaczana jest diagnostyczna baza wiedzy $\{W(\varepsilon(e_{i,j}))\}$, będąca ostatnim etapem procesu diagnostycznego. Informacja o stanie obiektu $\{W(\varepsilon(e_{i,j}))\}$ może być dalej wykorzystywana w postaci ekspertowej bazy wiedzy systemów decyzyjnych lub posłużyć jako dane wejściowe w kolejnym etapie procesu odnowy obiektu technicznego [19, 24].



Rys. 4.2. Schemat przetwarzania informacji w systemie diagnostycznym DIAG 2

4.2 System akwizycji danych i analiza sygnałów pomiarowych

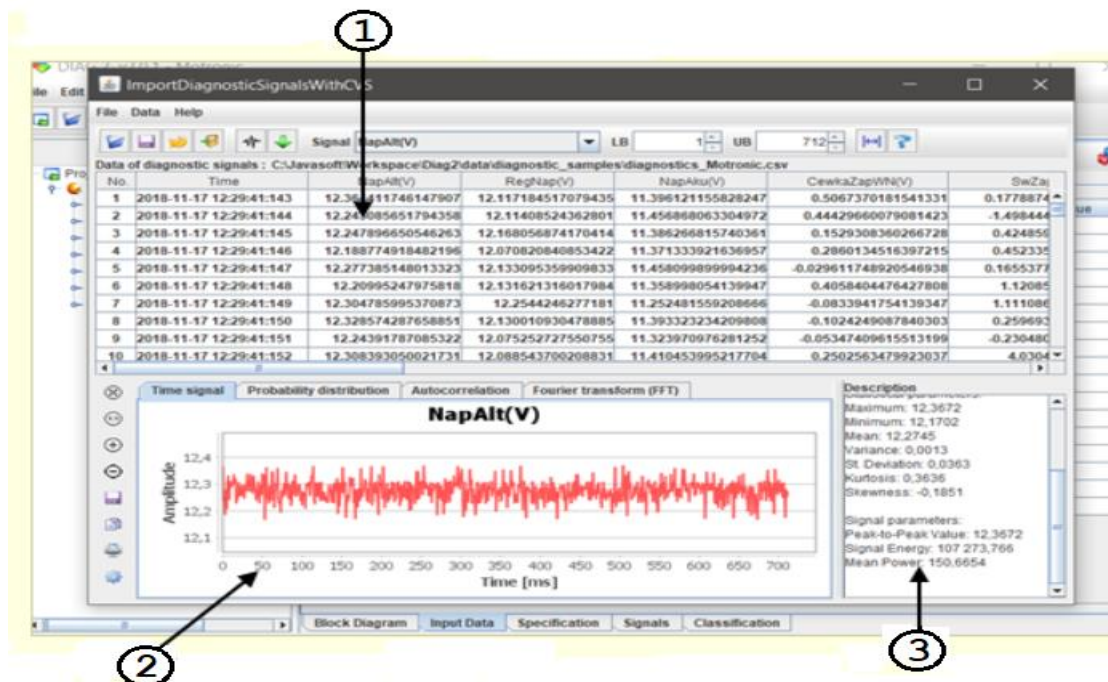
Celem każdego systemu akwizycji jest zebranie użytecznych danych pomiarowych w zależności od wymaganych parametrów rejestracji i zachowanie ich w pamięci trwałej. W omawianym systemie diagnostycznym do akwizycji danych zastosowano multimetr skanujący RIGOL M300 z dołączonym 20 kanałowym multiplekserem sygnałów pomiarowych MC3120 [136]. System ten przedstawiony na rysunku 4.3, umożliwia jednocześnie zbieranie dużej liczby pomiarów z wielu czujników i miejsc układu. Pliki zawierające dane pomiarów zapisywane są w formacie CSV (ang. comma-separated values) [139] i mogą być przechowywane zarówno w pamięci lokalnej jak i zewnętrznej.

Takie podejście umożliwia łatwe przechowywanie danych w postaci tabelarycznej, w której poszczególne wartości oddzielone są od siebie przecinkiem. Format CSV jest powszechnie obsługiwany zarówno przez urządzenia pomiarowe jak i większość edytorów tekstowych oraz arkuszy kalkulacyjnych.



Rys. 4.3. Panel przedni systemu akwizycji danych RIGOL M300 (po lewej) i tylny widok jednostki centralnej z kartami pomiarowymi (po prawej)

System akwizycji RIGOL M300 oferuje użytkownikowi rozbudowane funkcje pomiarowe i przełączające. Z tyłu urządzenia zawarto przestrzeń pozwalającą na instalację kart pomiarowych oraz niezbędnych interfejsów stosowanych w przemyśle tj, USB, GPIB, LAN, RS232. Dla kart pomiarowych przewidziano pięć wolnych slotów pozwalających na dodatkowy montaż modułów pomiarowych DMM, modułów multiplekserów lub modułów przekaźnikowych. Pomiar rejestrowane mogą być w różnych zakresach napięcia nieprzekraczających 300V i prądu do 1 A na każdy z kanałów.

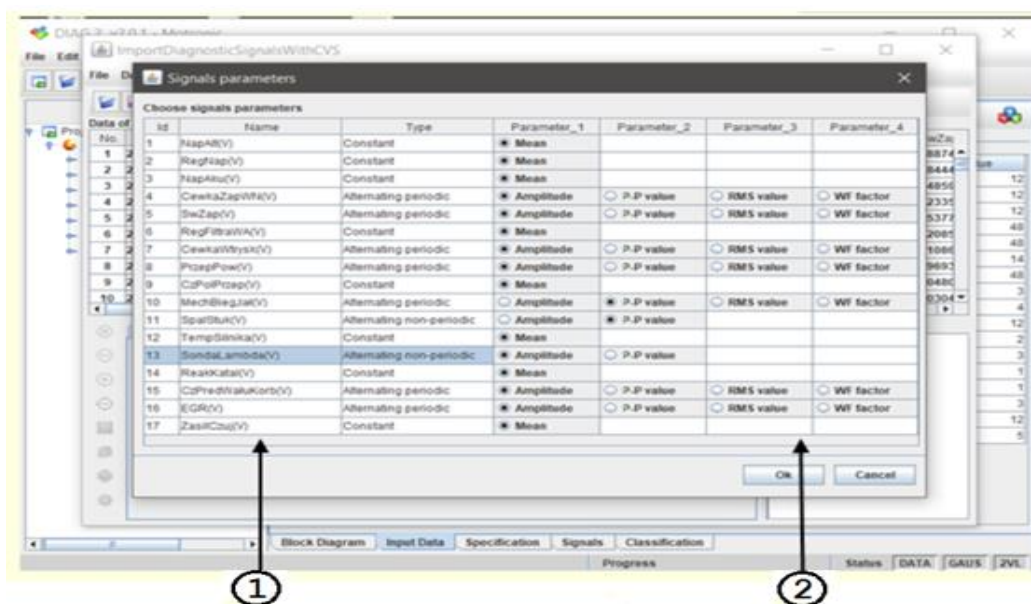


Rys. 4.4. Import i analiza danych sygnałów pomiarowych

W celu zaimportowania i analizy danych pomiarowych zapisanych w plikach z rozszerzeniem CSV utworzono moduł analizy sygnałów IDS w CVS (Import Diagnostic Signals witch CVS), Uruchomienie modułu, którego okno główne

przedstawiono na rysunku 4.4 wymaga wybrania z menu „data” lub panelu „Input Data” opcji „Add Ds” lub „Add Ns”. W pierwszym przypadku analizowane sygnały zostaną dodane do zbioru sygnałów diagnostycznych $\{X(e_{i,j})\}$, w drugim do zbioru sygnałów nominalnych $\{X_w(e_{i,j})\}$. Główne okno aplikacji importujące dane z plików CSV i przedstawione na rysunku 4.4, składa się z trzech części:

- górnej tabeli (1) zawierającej listę sygnałów w kolumnach i ich pomierzone wartości w rekordach. Liczba rekordów (próbek) określona w pewnym przedziale czasu powinna być taka sama dla wszystkich sygnałów, Pierwszy rekord w pliku opisuje nagłówki sygnałów, a pozostałe pomierzone dane,
- dolnego okna ze zbiorem wykresów (2) dla zadanego sygnału, używanych do wyznaczania parametrów sygnałów klasy elektrotechnicznej. W zbiorze prezentowanych wykresów możemy wyróżnić: przebieg w funkcji czasu (Time signal), rozkład gęstości prawdopodobieństwa (Probability distribution), autokorelację (Autocorrelation) i przebieg w funkcji częstotliwości (FFT). W celu uzyskania wykresów i ich parametrów należy wybrać polecenie „Analyse” z menu „Data”,
- dolne prawe okno zawierające obliczone parametry statystyczne (Statistical parameters) i parametry sygnałów (Signals parameters). Do tych pierwszych zaliczamy: wartość minimalną, maksymalną, średnią, wariancję, odchylenie standardowe, kurtozę i skośność. W drugiej grupie wyróżniamy wartość między szczytową, energię sygnału i moc średnią.



Rys. 4.5. Określenie parametrów badanych sygnałów pomiarowych

Analizator do rozpoznawania typu sygnału klasy elektrotechnicznej wykorzystuje funkcję rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, autokorelacji i szybkiej transformaty Fouriera [143]. W pierwszym kroku sprawdza czy badany sygnał jest stały $f(t) = \text{const}$ i jeśli tak to przypisuje mu tylko jeden parametr określający wartość średnią (mean). W przypadku wystąpienia sygnału zmiennego sprawdzana jest jego okresowość za pomocą funkcji autokorelacji. Dla sygnału okresowego uzyskujemy dostęp do wyboru jednego z czterech parametrów, a mianowicie: amplitudy (amplitude), wartości międzyszczytowej (P-P value), wartości skutecznej (RMS value) i współczynnika kształtu (WF factor). Jeżeli sygnał jest zmienny nieokresowy to uzyskujemy dostęp tylko do dwóch parametrów: amplitudy i wartości międzyszczytowej.

4.3 Komputerowy program diagnostyczny DIAG 2

Jednym z istotnych elementów opisywanego systemu diagnostycznego jest autorski program komputerowy DIAG 2 zawierający specjalistyczne oprogramowanie do realizacji procesu wnioskowania w logikach wielowartościowych dla $k \geq 2$. Stanowi on podstawę badawczo-rozwojową dla logik wielowartościowych ($k > 2$) i zaawansowanych algorytmów klasyfikacyjnych.

Po odczytaniu pliku z danymi wybieramy opcję „import data” i przechodzimy do okna z wyborem cech eksploatacyjnych badanych sygnałów (Signals Parameters). W module analizy sygnałów przedstawionego na rysunku 4.5 mamy możliwość wyboru tylko jednej cechy (parametru) dla klasy sygnałów elektrotechnicznych. Okno aplikacji pozwalające określić parametry badanego sygnału podzielone jest na dwie części. Pierwsza to lista analizowanych sygnałów (1) wraz z automatycznie określonym typem, a druga to lista parametrów możliwych do wybrania dla poszczególnego typu sygnału (2). Po wybraniu odpowiednich parametrów i naciśnięciu przycisku „OK”, obliczane są ich wartości, a następnie wprowadzane do systemu DIAG 2. Zaimplementowane automatyczne rozpoznanie rodzaju sygnału pozwala na przypisanie mu jednego z trzech typów, a mianowicie: sygnał stały (Constant), zmienny okresowy (Alternating periodic) i zmienny nieokresowy (Alternating non-periodic).

4.3.1 Specyfikacja

Komputerowy program diagnostyczny DIAG 2 jest programem typu „standalone” z graficznym interfejsem użytkownika (GUI, ang. Graphical User Interface), napisanym w popularnym języku obiektowym Java [86]. Zastosowanie języka Java oraz potrzebnej

do uruchomienia aplikacji maszyny wirtualnej (JVM) pozwoliło uzyskać niezależność od systemu operacyjnego. Ma to znaczenie głównie w środowiskach naukowych, gdzie wykorzystuje się wiele mniej znanych i popularnych systemów operacyjnych. Pomimo, że JVM jest pośrednim środowiskiem uruchomieniowym, to etapowy charakter działania programu nie wpływa znacząco na wydajność w stosunku do aplikacji utworzonych w językach natywnych.

Podobne podejście dotyczące zastosowania powszechnych standardów przyjęto również wybierając format danych zarówno dla opisu struktury projektu jak i danych pomiarowych.. W pierwszym przypadku wykorzystano pliki w formacie XML (ang. Extensible Markup Language, a w drugim pliki CSV (comma-separated values). Popularność standardu XML w opisie plików konfiguracyjnych oraz metadanych pozwoliło na uzyskanie dużej elastyczności podczas przechowywania i edycji danych [147]. Tego typu dane zapisywane w postaci ściśle określonych struktur mogą być przechowywane zarówno w plikach (dokumentach) jak i dedykowanych bazach danych. Dodatkowo standard XML umożliwia konwersję do innych modeli danych np. model relacyjny oraz łatwą modyfikację utworzonych struktur w przypadku dalszej rozbudowy systemu. Dla danych pomiarowych sytuacja wygląda podobnie, gdyż standard CSV obsługiwany jest przez większość urządzeń pomiarowych pozwalając na przedstawienie wartości zbioru sygnałów diagnostycznych w postaci tabelarycznej.

Opisywany zatem system diagnostyczny cechuje się zwartą budową umożliwiającą łatwy dostęp do poszczególnych etapów w dowolnym momencie użytkownika. Czytelny i intuicyjny interfejs obsługi użytkownika (GUI) podzielony został na grupy tematyczne rozdzielone separatorami. W przypadku dużej liczby opcji w grupie, zastosowane grupowanie zagnieżdżone (podgrupy). Większość opcji dotycząca poszczególnych etapów dostępna jest w menu głównym, paskach narzędziowych lub w menu kontekstowym danego panelu. Wszystkie tabele, schematy i wykresy mogą być oddzielnie drukowane lub zapisywane w postaci plików graficznych na nośnikach pamięci trwałej.

4.3.2 Wymagania, ograniczenia i uruchomienie programu

Omawiany program diagnostyczny DIAG 2 w praktyce może zostać uruchomiony na każdym komputerze zawierającym 32 lub 64 bitową architekturę x86. Aplikacja nie zawiera bibliotek natywnych, więc wymagany system operacyjny musi jedynie umożliwić dostęp do „pluginu” uruchomieniowego języka programowania Java JRE

(ang. Java Runtime Environment) w wersji 7+. Dokładne wymagania sprzętowe oraz programowe przedstawiono w tabeli 4.1, a strukturę i zawartość katalogów programu diagnostycznego DIAG 2 zawarto w tabeli 4.2.

Tabela 4.1. Wymagania sprzętowo-programowe aplikacji DIAG 2

x86	32 lub 64 bitowa architektura komputerów PC
OS	Dowolny system operacyjny na którym można zainstalować wirtualną maszynę Javy np. Windows 7,8,10, Linux, iOS
JVM 7+ (JRE)	Uruchomieniowe środowisko języka programowania Java (JRE) w wersji minimum 7 oraz równoważne wersje OpenJDK. zawiera maszynę wirtualną Javy (JVM)
RAM	Minimum 2 GB, w praktyce rozmiar zależny od minimalnych wymagań systemu operacyjnego
HDD	20 MB + przestrzeń dyskowa wymagana do składowania plików z danymi pomiarowymi

Program możemy uruchomić za pomocą skryptu wsadowego run.bat (Windows OS) lub bezpośrednio wykorzystując polecenie „java” z parametrem „classpath” zawierającym listę bibliotek oraz klasą startową „msld.app.Diag”.

```
java -classpath ".;/lib/commons-math3-3.2.jar;/lib/encog-core-3.1.0.jar;/lib/forms-1.2.0.jar;
./lib/html2image-0.1.0.jar;/lib/itextpdf-5.5.4.jar;/lib/jcalendar.jar;/lib/jcommon-1.0.22.jar;
./lib/jfreechart-1.0.18.jar;/lib/jgraphx.jar;/lib/l2fprod-common-sheet.jar;/lib/log4j-1.2.11.jar;
./lib/org-openide-awt.jar;/lib/org-openide-util.jar;/lib/org-openide-util-lookup.jar;
./lib/xmlworker-5.4.1.jar;/bin" msld.app.Diag
```

Strukturę katalogów wchodzących w skład aplikacji diagnostycznej DIAG 2 przedstawiono w tabeli 4.2. Zawiera ona pięć katalogów, z których najważniejszym dla użytkownika jest katalog „data”. Katalog ten ustawiony jest jako domyślne miejsce składowania plików z metadanymi dotyczącymi zawartości projektów (XML) jak i danych zawierających pomiary (CVS). W katalogu o nazwie „conf” i „lib” zawarto pliki konfiguracyjne oraz biblioteki niezbędne do działania programu. Wszystkie skompilowane pliki aplikacji umieszczono w katalogu „msld”, będącym jednocześnie pakietem nadrzędnym (głównym węzłem) w hierarchicznym dostępie do klas

(ścieżkach). Natomiast wiązki zasobów wspierające internacjonalizację oraz pliki graficzne wykorzystywane przez program umieszczono w katalogu „resources”.

Tabela 4.2. Struktura plików i katalogów (DIAG 2)

conf	Katalog zawierający pliki konfiguracyjne
data	Katalog zawierający pliki z danymi dotyczącymi struktury projektu i pomierzonymi wartościami sygnałów
lib	Katalog zawierający biblioteki programu (archiwa JAR)
msld	Główny katalog aplikacji zawierający pakiety i klasy
resources	Katalog zawierający pliki graficzne, opis kontekstu pomocy i zasoby związane z internacjonalizacją
report	Katalog zawierający wygenerowane raporty, schematy i wykresy z wynikami procesu wnioskowania
run.bat	Plik uruchamiający program DIAG 2

Omawiany w podrozdziale program diagnostyczny DIAG 2, umieszczony został na płycie CD w wersji demonstracyjnej z następującymi ograniczeniami:

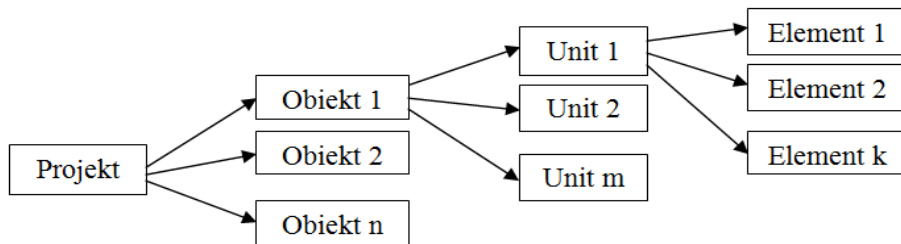
- wyłączony moduł sztucznej inteligencji z SSN i logiką rozmytą,
- brak bazy danych (SZBD) do przechowywania pomiarowej i diagnostycznej bazy wiedzy,
- możliwość wyboru tylko jednej cechy eksploatacyjnej (parametru) dla klasy sygnałów elektrotechnicznych w module analizy sygnałów.

4.3.3 Struktura projektu

Zastosowanie w programie hierarchicznej struktury modelu umożliwiło analizę złożonych obiektów technicznych, w ramach jednego projektu. Realizowane jest to poprzez dekompozycję elementów składowych obiektu do schematu funkcjonalno-diagnostycznego, opisanego w rozdziale 3 z wykorzystaniem reguł $R_{d1} - R_{d4}$ (3.1-3.4). W strukturze projektu przedstawionego na rysunku 4.6 i 4.7, możemy rozpatrywać więcej niż jeden obiekt, gdzie kolejny obiekt może być szczegółową analizą dowolnego elementu z wcześniejszego obiektu. Uzyskujemy w ten sposób zwiększenie stopnia głębokości badanego obiektu oraz hermetyzację jego elementów składowych. Struktura wewnętrzna każdego obiektu podzielona jest na cztery poziomy struktury obsługowej [62, 70]: poziom pierwszy: obiekt $\{O\}$, poziom drugi: zespoły funkcjonalne $\{E_i\}$

w obiekcie, poziom trzeci: podzespoły $\{e_j\}$ w każdym zespole i poziom czwarty: elementy podstawowe $\{e_{i,j}\}$.

Zespoły funkcjonalne E_i określane są w projekcie jako „Unity”, a elementy podstawowe $e_{i,j}$ jako „Elementy”, Podzespoły funkcjonalne poziomu trzeciego e_j pełnią rolę elementów pośrednich umożliwiając dwukierunkowe przekształcenie hierarchicznego modelu obiektu do postaci macierzowej struktury wewnętrznej przedstawionej w tabeli 3.1-3.2.



Rys. 4.6. Struktura projektu zastosowana w programie DIAG 2 [3]

W jednym projekcie może znajdować się więcej niż jeden obiekt techniczny. Ma to istotne znaczenie w przypadku badania obiektów o wielopoziomowej strukturze wewnętrznej, w której złożone elementy podstawowe możemy rozpatrywać jako oddzielne obiekty. W ten sposób struktura elementu może być poddana dalszej dekompozycji na kolejne cztery poziomy zgodnie z regułami (3.1-3.4).

Node	Content
project	
code	P
name	Sterownik silnika samochodowego Motronic 4.1
description	Sterownik silnika
author	Bernatowicz Dariusz
date	2015-01-13
object	
id	1
code	O1
name	Układ sterowania
date	2015-01-13
description	Elektroniczne urządzenie
schema	
unit	
id	1
code	E1
name	Układ zapłonowy
date	2015-01-13
description	

```

2<project>
3  <code>P</code>
4  <name>Sterownik silnika samochodowego Motronic 4.1</name>
5  <description>Sterownik silnika samochodowego Motronic 4.1</description>
6  <author>Bernatowicz Dariusz</author>
7  <date>2015-01-13</date>
8  <object id="1">
9    <code>O1</code>
10   <name>Układ sterowania</name>
11   <date>2015-01-13</date>
12   <description>Elektroniczne urządzenie</description>
13   <schema><![CDATA[<mxGraphModel><
14   <unit id="1">
15     <code>E1</code>
16     <name>Układ zapłonowy</name>
17     <date>2015-01-13</date>
18     <description/>
19     <element id="1">
  
```

Rys. 4.7. Edycja pliku ze strukturą projektu w postaci hierarchicznej i formacie XML

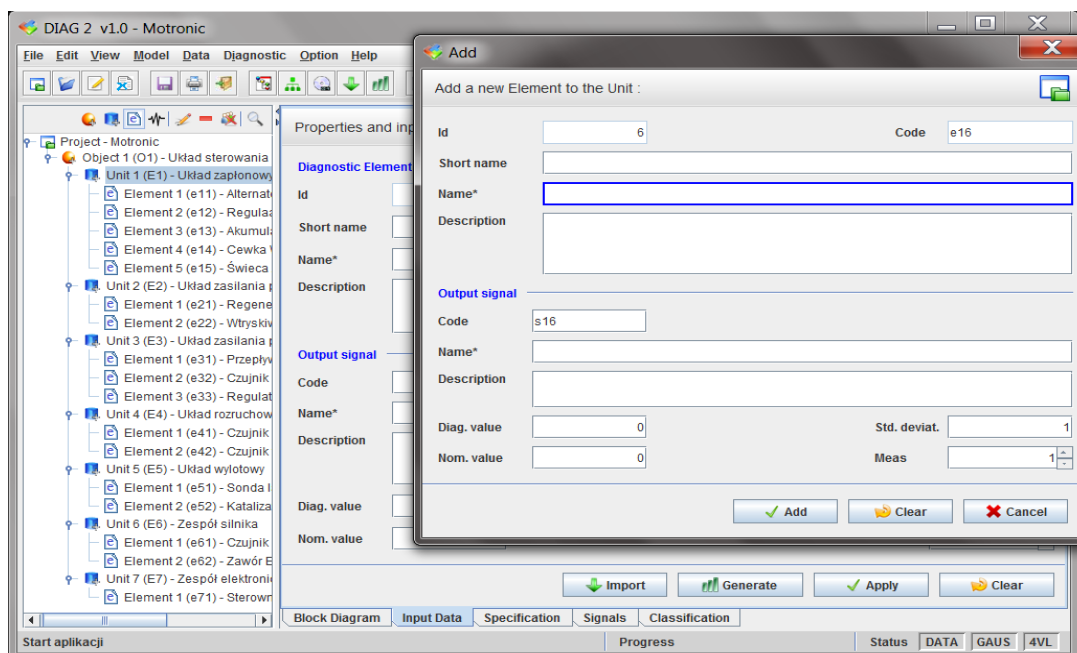
Uzyskujemy w ten sposób strukturę danych reprezentujących „drzewo matematyczne” o dowolnym poziomie zagnieżdżenia zakończonym na elemencie podstawowym [82]. Powyższy sposób podziału struktury obsługowej obiektu zapewnia wygodną postać opisywania (adresowania) elementów składowych tej struktury. Umożliwia również wprowadzanie zmian w dowolnym czasie badanego obiektu, w tym zmianę liczby zespołów lub elementów podstawowych w danym zespole.

Pliki zawierające metadane projektu można otwierać i modyfikować w dowolnym edytorze XML co pokazano na rysunku 4.4. Należy jednak pamiętać, że standard XML wymaga poprawności składni (ang. well-formed) co wiąże się głównie z zachowaniem kolejności elementów i ich odpowiedniego zamknięcia. Program DIAG 2 nie zawiera edytora plików w formacie XML, a jedynie informuje o miejscu wystąpienia błędu podczas operacji odczytu struktury projektu.

Wszystkie pliki zawierające metadane projektu znajdują się domyślnie w katalogu „data”. Pomimo, że jest to katalog umowy aplikacja umożliwia otwarcie lub zapis projektu w wybranym przez użytkownika katalogu pamięci trwałej. Do podstawowych operacji dotyczących statusu projektu możemy zaliczyć:

- New Project – określa polecenie utworzenia nowego projektu. Jeśli inny projekt jest już otwarty, to użytkownik zostanie poinformowany o konieczności jego zapisu i zamknięcia. Utworzenie nowego projektu ustawia wszystkie parametry z nim związane na wartość domyślną. Zmianę wartości domyślnych parametrów możemy uzyskać w oknie konfiguracji za pomocą opcji Preferences,
- Open project – określa polecenie otwarcia istniejącego projektu z wybranej ścieżki pamięci trwałej. W przypadku istnienia w danym momencie aktywnego projektu użytkownik zostanie poinformowany o konieczności wykonania operacji jego zapisu i zamknięcia. Wszystkie obiekty wraz z komponentami otwieranego projektu zsynchronizowane zostaną z panelami roboczymi aplikacji, a parametry ustawione na wartość domyślną. Jeśli podczas odczytu struktury projektu wystąpią błędy to polecenie zostanie przerwane, a użytkownik poinformowany o przyczynie i miejscu wystąpienia błędu,
- Save project – określa polecenie zapisu w pamięci trwałej utworzonego lub otwartego projektu. Jeśli otwarty projekt nie został zmodyfikowany to zapis nie będzie realizowany. W przypadku wystąpienia konfliktu nazw stary plik zostanie nadpisany nową zawartością,

- Close project - określa polecenie zamknięcia aktualnie używanego projektu. W przypadku wprowadzenia zmian w trakcie sesji e projektu nastąpi dialog dotyczący zapisania nowych wartości.



Rys. 4.8. Formularz dodawania nowego elementu do struktury projektu [3]

Podczas tworzenia projektu jak i pozostałych elementów struktury tj. obiekty, unity i elementy wymagane jest wypełnienie odpowiedniego formularza w oknie dialogowym, jak pokazano na rysunku 4.8. Każdy taki formularz zawiera charakterystyczne dane dla poszczególnych elementów struktury np. pełną i skróconą nazwę, opis, kod, autor, data itp. Jeśli otworzymy istniejący już projekt (Open Project) to cała struktura, schematy obiektów, dane wejściowe i zmienne konfiguracyjne zostaną odpowiednio ustawione w panelach realizujących proces diagnostyczny.

4.4 Podstawy opracowania diagnostycznego w programie DIAG 2

System DIAG 2 realizuje pełen proces diagnostyczny składający się z oddzielnych etapów dostępnych w występujących po sobie panelach. W poszczególnych etapach wykonujemy następujące po sobie działania: [3]

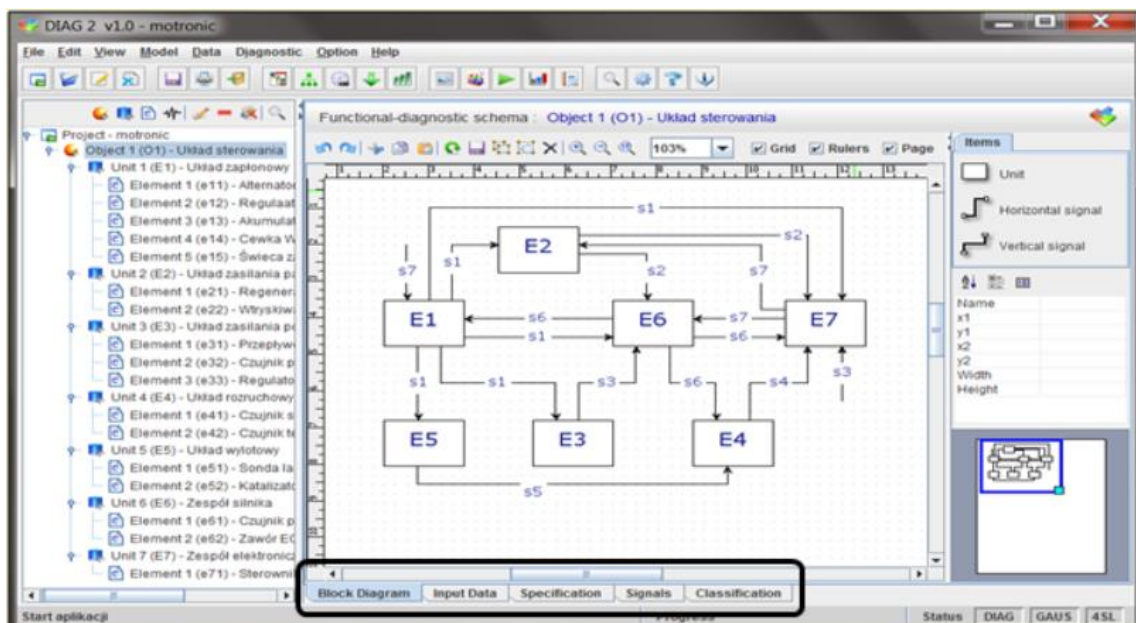
- określenie modelu obiektu technicznego i na jego podstawie utworzenie struktury oraz schematu funkcjonalno-diagnostycznego,
- wyznaczenie zbioru informacji diagnostycznej badanego obiektu w podsystemie diagnostycznym poprzez badanie stanu, analizę jego modelu oraz obserwacje rzeczywistego procesu eksploatacji,

- utworzenie struktury wewnętrznej obiektu w postaci tablicy sygnałów diagnostycznych umożliwiającej dalsze obliczenia,
- wnioskowanie diagnostyczne w logice wielowartościowej (dwu, trzy i czterostanowej) przy określonych przedziałach stanów,
- klasyfikacje stanów badanego obiektu poprzez analizę uzyskanych wyników w procesie wnioskowania
- prezentacje uzyskanych wyników w postaci map stanów, wykresów i raportów oraz porównanie rezultatów klasyfikacji dla różnej liczby stanów.

Wyżej wymienione działania procesu diagnozowania realizowane są w postaci etapów w oddzielnych panelach. Występujące po sobie panele aktywowane są wyborem zakładki w dolnej części panelu centralnego. Wyróżnić możemy następujące panele Block Diagram, Input Data, Specification, Signals i Classification. Dostęp do trzech ostatnich paneli następuje dopiero po wprowadzeniu danych pomiarowych i ich zatwierdzeniu opcją „Apply”.

4.4.1 Block Diagram Panel

Główne okno aplikacji przedstawione na rysunkach 4.9-4.12 dzieli ją na dwie podstawowe części: lewą zawierającą hierarchiczną strukturę projektu wraz z jego elementami i prawą centralną realizującą poszczególne etapy procesu diagnozowania.



Rys. 4.9. Hierarchiczna struktura projektu oraz schemat funkcjonalno-diagnostyczny na poziomie zespołów funkcjonalnych obiektu technicznego [3]

Lewy panel jest panelem głównym, zawsze dostępnym i w pełni zintegrowanym z poszczególnymi etapami panelu centralnego. Oznacza to, że jakiegokolwiek zmiany wprowadzone w strukturze projektu są automatycznie aktualizowane w panelu centralnym. Przebieg procesu diagnozowania wraz z jego konfiguracją rozpatrywany jest niezależnie dla każdego obiektu. Pojedynczy obiekt wykazuje cechy hermetyzacji i unikalności co pozwala na zróżnicowanie stopnia głębokości diagnozowania poszczególnych elementów. Wybór innego lub utworzenie nowego obiektu powoduje zachowanie w pamięci trwałej (opcja Save) dotychczasowych wyników i rozpoczęcie edycji nowego procesu diagnostycznego.

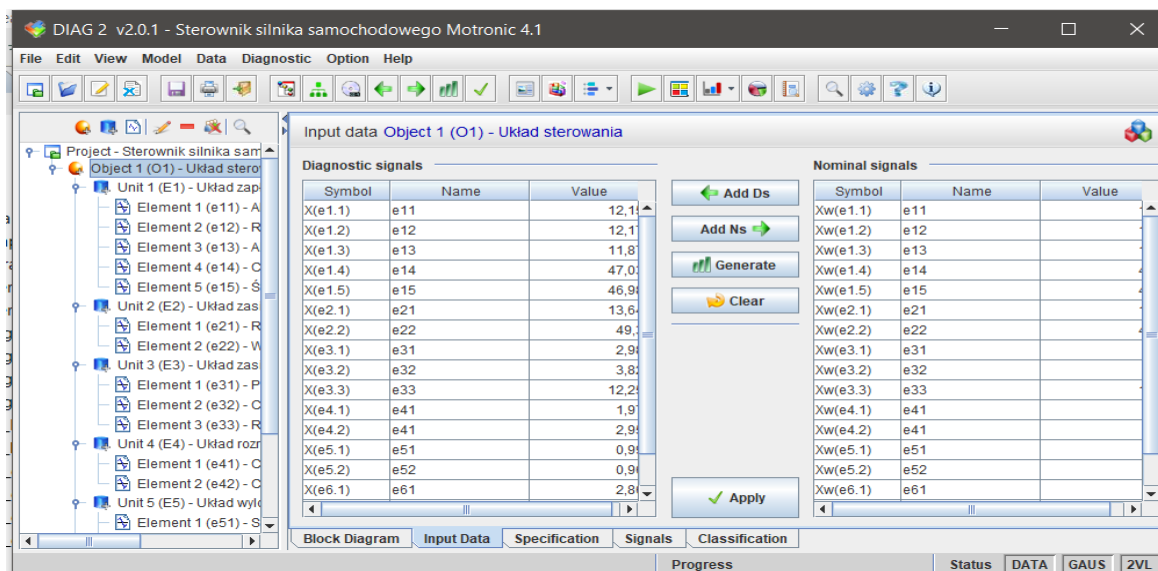
Pierwszy panel opracowania diagnostycznego przedstawiony na rysunku 4.9 umożliwia zdefiniowanie struktury obiektu technicznego w postaci schematu funkcjonalno-diagnostycznego na podstawie którego wyznaczamy zbiór sygnałów pomiarowych $\{X_{i,j}\}$. Za pomocą edytora graficznego możemy dodawać, usuwać lub edytować zespoły funkcjonalne oznaczane symbolem E_i , gdzie i wskazuje numer porządkowy zespołu w obiekcie. Każdy zespół zawiera przypisany mu tylko jeden sygnał wychodzący oznaczany symbolem S_i , oraz wiele sygnałów przychodzących. Analogicznie sytuacja wygląda w przypadku elementów podstawowych, gdzie pojedyncze sygnały elementu są sygnałami pomiarowymi.

Zsynchronizowanie panelu „Block Diagram” ze strukturą hierarchiczną obiektu przedstawionego w lewym panelu okna aplikacji pozwala na automatyczne uzupełnianie poszczególnych elementów obiektu.

4.4.2 Input Data Panel

Po utworzeniu struktury modelu funkcjonalno-diagnostycznego badanego obiektu w kolejnym panelu wprowadzamy dane pomiarowe sygnałów diagnostycznych i nominalnych. Wprowadzanie danych odbywać się może w trybie manualnym, importu z pliku lub wartości wygenerowanych losowo z przyjętymi parametrami. Panel „Input Data” przedstawiony na rysunku 4.10 podzielony został na dwie części: lewą zawierającą listę wartości sygnałów diagnostycznych i prawą z równoważną listą sygnałów nominalnych. W celu importu danych z plików zewnętrznych należy wybrać opcję „Ad Ds” lub „Add Ns” analogicznie do rodzaju wskazywanego sygnału. Po wybraniu jednej z tych opcji przejdziemy do modułu analizy danych IDSwCVS opisanego w rozdziale 4.2. Podczas importu danych liczba sygnałów w strukturze jak i odczytywanym pliku musi być sobie równa. W omawianym panelu możemy jedynie

edytować wartości poszczególnych sygnałów pomiarowych, natomiast dodanie lub usunięcie dowolnego sygnału wymaga powrotu do pierwszego panelu definiującego strukturę obiektu. Takie czynności mogą spowodować zmianę indeksowania pozostałych sygnałów i doprowadzić do konieczności ponownego importu danych pomiarowych. Aby wprowadzone dane zostały zapisane w pamięci roboczej należy je zaakceptować wybierając opcję „Apply”.



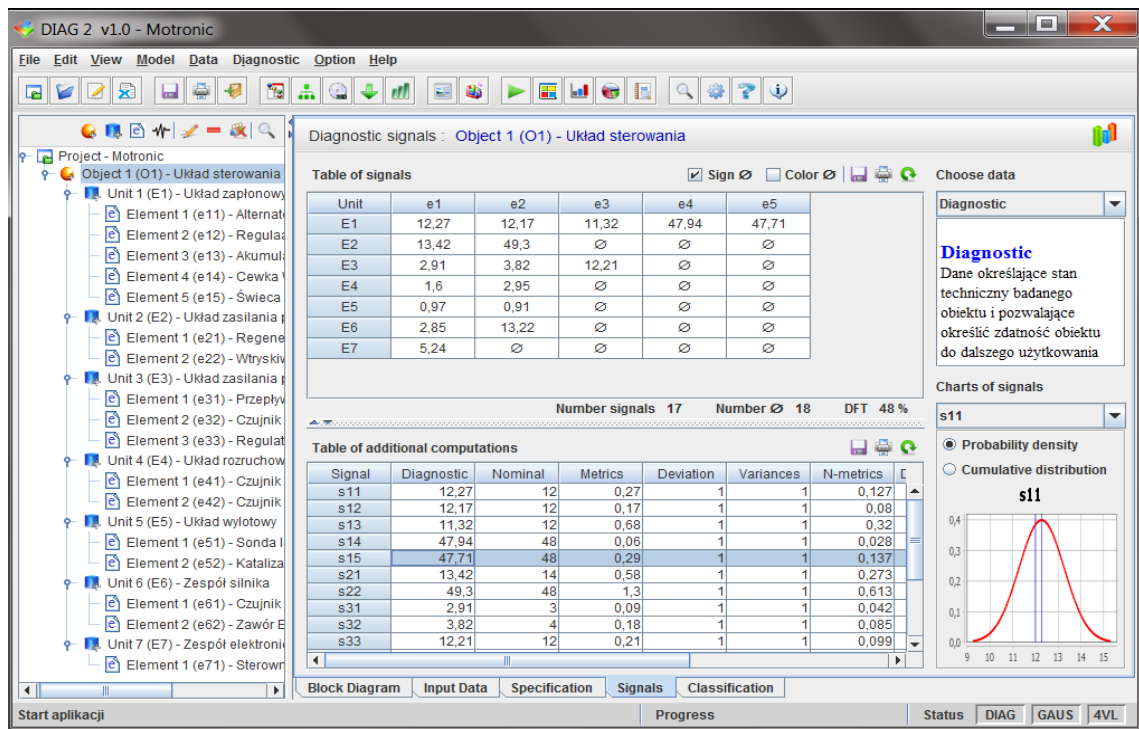
Rys. 4.10. Panel z wprowadzaniem danych pomiarowych sygnałów-diagnostycznych

Zatwierdzenie wprowadzonych danych powoduje odblokowanie kolejnych paneli związanych z procesem diagnostycznym. Dane pomiarowe zapisane zostają w pamięci podręcznej i są dostępne we wszystkich kolejnych panelach. Jakakolwiek zmiana struktury obiektu wymaga ponownego zatwierdzenia wprowadzonych danych i odblokowania paneli.

4.4.3 Signals Panel

Kolejnym krokiem po wprowadzeniu wartości sygnałów pomiarowych jest przejście do panelu z zakładką „Signals”. Panel ten dzieli się na dwie główne części: górna przedstawiająca tablicę zbioru sygnałów diagnostycznych i dolna zawierająca pośrednie obliczenia realizowane na wartościach tych sygnałów. Obliczenia prezentowane są w postaci kolejnych kolumn tabeli, gdzie wiersze określają zbiór elementów podstawowych struktury wewnętrznej badanego obiektu. W kolumnach dolnej tabeli możemy wyróżnić: wartości pomiarowe sygnałów (Diagnostic), wartości nominalne (Nominal), metryki (Metric), odchylenia wektora metryki (Deviation), wariancje (Variance), normę metryki odległości (N-metric), dystrybuantę (Distribution), prawdopodobieństwa (Probabilite),

prawdopodobieństwa zgodności sygnałów (ZG Probabilitie) i współczynniki wagowe (WG weight).



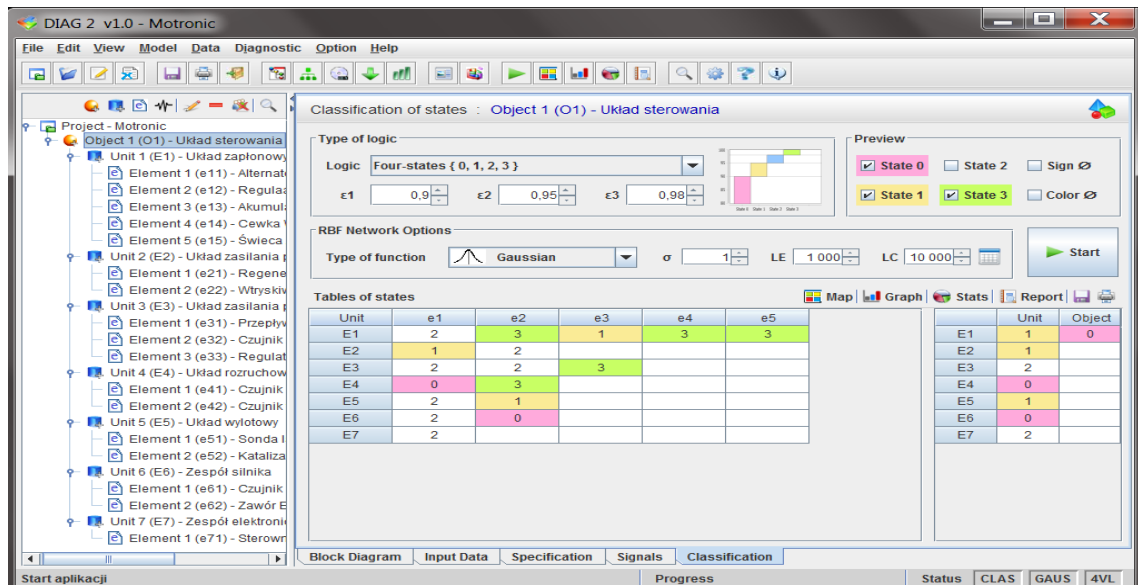
Rys. 4.11. Panel przedstawiający zbiór sygnałów-diagnostycznych i tablicę dodatkowych obliczeń na wartościach tych sygnałów

Wyznaczony w czasie opracowania diagnostycznego zbiór jego elementów funkcjonalnych $\{e_{i,j}\}$ jest podstawą do zestawienia w postaci tablicowej zbioru sygnałów diagnostycznych. Przykładową tablicę zbioru sygnałów przedstawiono na rysunku 4.11. Z prawej strony panelu znajduje się wykres funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa (rozkład normalny) i dystrybuanty dla każdego sygnału diagnostycznego. Jako parametry i markery funkcji określono wartość nominalną (średnią), wartość diagnostyczną oraz odchylenie standardowe. Odległość między markerami pionowymi danego sygnału określa jego metrykę.

4.4.4 Classification Panel

W celu ustawienia i skonfigurowania procesu wnioskowania w programie DIAG 2 należy przełączyć się na panel „Classification” przedstawiony na rysunku 4.12. W górnej części panelu możemy wybrać liczbę stanów oraz przypisany im rozmiar przedziałów zmian. W zależności od wybranej liczby stanów odpowiadające im przedziały zmieniają się według schematu klasyfikacji stanów obiektu dla logiki dwu, trzy i czterowartościowej przedstawionej na rysunku 2.5. Poniżej możemy skonfigurować algorytm wnioskowania z wykorzystaniem sieci neuronowej RBF [51,

69] i logikę rozmytą opisującą granicę przedziałów zmian [85]. Proces klasyfikacji uruchamiany jest przyciskiem „Start” i posiada opcję przerwania lub zatrzymania w celu ponownego wznowienia.

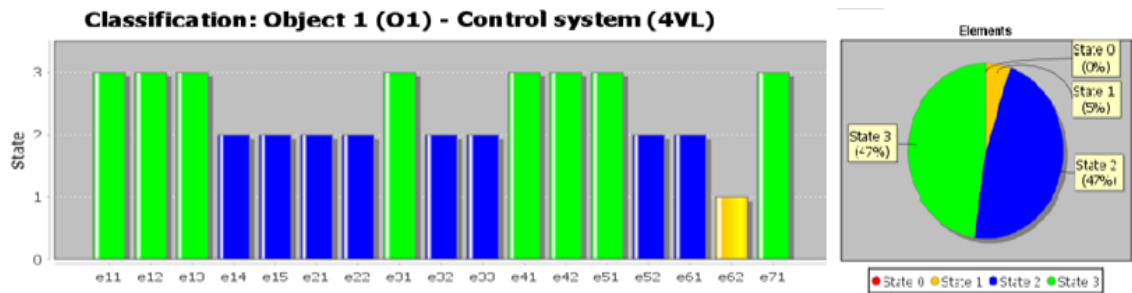


Rys. 4.12. Panel przedstawiający mapy stanów uzyskane w procesie klasyfikacji

W centralnej części panelu przedstawione są tabele zawierające rozpoznane stany elementów podstawowych oraz zespołów funkcjonalnych wyznaczonych w procesie wnioskowania. Stany obiektu określane są na podstawie badania zbioru sygnałów wyjściowych i polegają na porównywaniu obrazu sygnału diagnostycznego z obrazem jego sygnału wzorcowego (nominalnego). Sprawdzamy więc, czy wartości sygnałów wyjściowych poszczególnych elementów mieszczą się w zakresie ich zmian dopuszczalnych. Etap klasyfikacji dla czterowartościowej oceny stanów realizowany jest według reguł (3.19-3.24) opisanych w rozdziale 3.

4.4.5 Prezentacja wyników procesu klasyfikacji

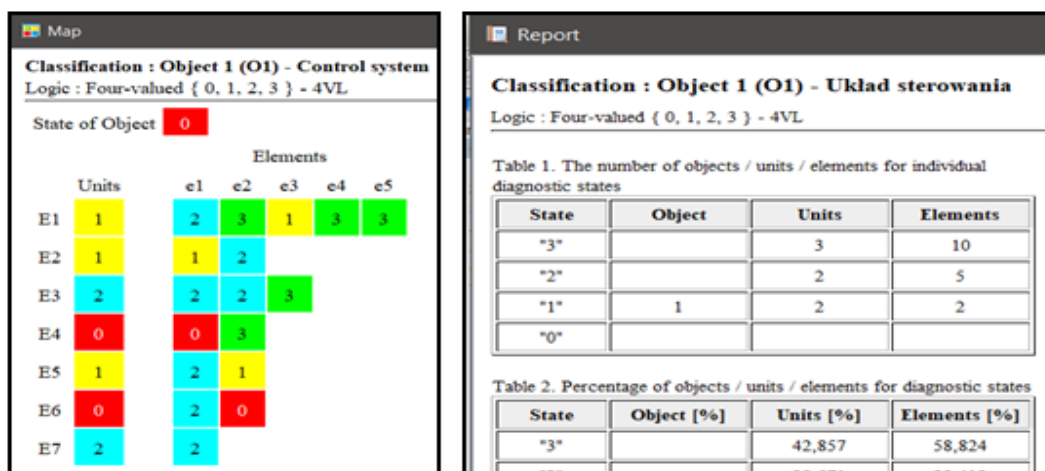
Uzyskane rezultaty w procesie klasyfikacji mogą zostać przedstawione lub zapisane w różnej postaci. Oprócz zaprezentowanej na rysunku 4.12 tabeli stanów możemy także skorzystać z wykresów, map stanów i raportów. Połączenie poszczególnych form prezentacji pozwala na dokładniejszą analizę lub porównanie wyników uzyskanej klasyfikacji dla różnych typów zastosowanej logiki stanów. Opcje prezentacji znajdują się nad tabelą stanów, a dostęp do nich uzyskujemy dopiero po wykonaniu procesu klasyfikacji. Wszystkie wykresy oraz raporty posiadają możliwość wydruku oraz zapisu do pamięci trwałej. W panelu wnioskowania możemy wyróżnić następujące formy przedstawienia uzyskanych rezultatów w procesie klasyfikacji:



Rys. 4.13. Przykładowe wykresy przedstawiające stany elementów podstawowych obiektu w logice czterowartościowej (4VL); histogram po lewej i procentowy wykres kołowy po prawej

- Charts – zawiera wykresy kołowe i histogramy dla zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych badanego obiektu. Przykładowe wykresy elementów systemu kontroli w logice czterowartościowej przedstawiono na rysunku 4.13. Histogram (po lewej) przedstawia różne poziomy stanów pozwalając jednoznacznie określić, który z elementów znajduje się w stanie krytycznej lub częściowej niezdatności. Natomiast wykres kołowy (po prawej) zawiera procentowy udział elementów, w których wystąpił określony stan.
- Map – określa mapę stanów przedstawiającą pokolorowaną i opisaną symbolami siatkę (tabelę) stanów, umożliwiającą ogólny podgląd wszystkich zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych obiektu. Cechuje się ona dużą czytelnością i przegłędem składowych komponentów obiektu na różnych poziomach wnikania w strukturę obsługową. Przykładową mapę dla systemu kontroli zawierającą 7 zespołów funkcjonalnych i 17 elementów pokazano po lewej stronie rysunku 4.14. Dwa elementy ze stanem niezdatności określanym symbolem „0” determinują ten sam stan w dwóch zespołach funkcjonalnych, a następnie w ocenie obiektu.
- Statistics - zawiera tabele ze statystykami otrzymanymi w procesie wnioskowania. Wyróżnić tu możemy liczbę elementów w których wystąpiły poszczególne stany, ich procentową liczbę w stosunku do wszystkich elementów oraz obliczenia pomocnicze z panelu „Signals”. Przykładowy fragment okna z danymi statystycznymi przedstawiono po prawej stronie rysunku 4.14.
- Raport klasyfikacji przedstawiający w sposób opisowy konfigurację, przebieg i wyniki etapu klasyfikacji. Dodatkowo zawiera tabelę z listą elementów obiektu oraz pomiarową i diagnostyczną bazę wiedzy. Prezentuje całościowe

podsumowanie przeprowadzonego procesu wnioskowania z wykresami i statystyką opisaną powyżej,



Rys. 4.14. Przykładowa mapa stanów (po lewej) i statystyka (po prawej) z procesu diagnozowania obiektu w logice czterowartościowej (4VL)

Przedstawione formy prezentacji uzyskanych wyników z procesu wnioskowania można łączyć w zbiorcze podsumowanie dla różnej liczby stanów w logikach wielowartościowych. Takie działanie pokazuje jednoznacznie korzyści płynące z wprowadzania dodatkowych stanów w aspekcie informacyjnym.

4.5 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono model komputerowego systemu diagnostycznego i opisano jego elementy składowe. Scharakteryzowano system akwizycji danych RIGO M300 i moduł analizy IDS w CVS dla sygnałów pomiarowych klasy elektrotechnicznej. Następnie omówiono specyfikację i wymagania autorskiego programu diagnostycznego DIAG 2. W dalszej części rozdziału przedstawiono elementy składowe struktury projektu dla badanego obiektu oraz standaryzację przechowywania danych w postaci metadanych XML i danych pomiarowych w plikach CVS. W kolejnym etapie omówiono przebieg procesu diagnozowania i odpowiadające im panele w programie diagnostycznym DIAG 2. Dotyczą one głównie takich czynności jak: tworzenie schematu funkcjonalno-diagnostycznego obiektu, wprowadzanie danych diagnostycznych, wyznaczanie pomiarowej bazy wiedzy i realizacji procesu wnioskowania. Na koniec przedstawiono sposoby prezentacji wyników uzyskanych w procesie klasyfikacji obiektu.

5 Diagnostowanie systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic

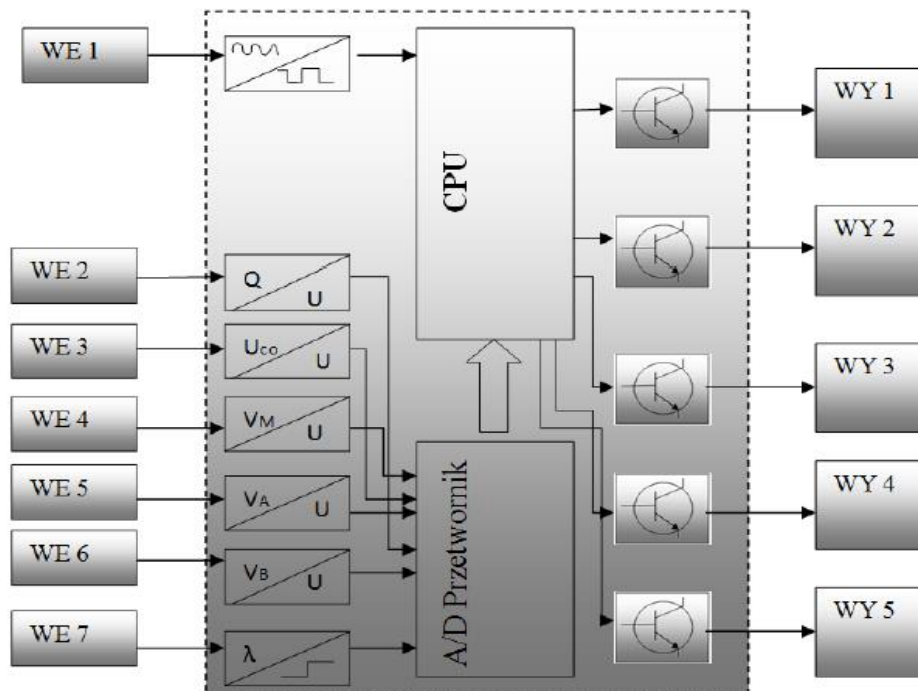
W poprzednich rozdziałach opracowano podstawy teoretyczne czterowartościowej oceny stanów obiektu technicznego oraz scharakteryzowano komputerowy system diagnostyczny DIAG 2. W niniejszym dokonana zostanie praktyczna weryfikacja założeń teoretycznych dotyczących procesu diagnostowania dla urządzenia elektronicznego systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1. Na początku opisane zostanie stanowisko badawczo-laboratoryjne oraz przetwarzanie informacji w urządzeniu sterującym. W dalszej części rozdziału przeprowadzony zostanie pełen proces diagnostyczny z wyznaczeniem struktury funkcjonalno-diagnostycznej i bazy sygnałów pomiarowych. Na koniec zamieszczone zostaną uzyskane wyniki z procesu wnioskowania i ich porównanie dla różnej liczby stanów $k = \{2,3,4\}$ w logikach wielowartościowych.

5.1 Wprowadzenie

System sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym typu Motronic jest układem regulacji dopływu powietrza i paliwa do silnika. Elektroniczne urządzenie sterujące (mikroprocesor) kieruje pracą podsystemów zapłonu i wtrysku paliwa, optymalizując proces zapłonu pod kątem aktualnego trybu pracy. Działania te umożliwiają regulację prędkości biegu jałowego silnika za pomocą układów współpracujących przedstawionych na rysunku 5.1 [58]. Sterowane podsystemy zapłonu i wtrysku silnika korzystają ze wspólnych czujników oraz ze wspólnego systemu przetwarzania danych. Układ typu Motronic jest więc systemem sterowania z cyfrowym przetwarzaniem danych. Posiada on również szerokie możliwości samodiagnostyczne oraz może współdziałać z innymi elektronicznymi systemami pojazdu takimi, jak: ABS, ASR, automatyczna skrzynia biegów czy też układ klimatyzacji [79].

W systemie wielopunktowego wtrysku typu Motronic paliwo doprowadzane jest równocześnie do wszystkich kanałów dolotowych niezależnie od cykli pracy poszczególnych cylindrów. Proces ten następuje w sposób cykliczny raz na jeden obrót wału korbowego ale za każdym razem wtryskiwana jest tylko połowa wymaganej dawki paliwa. Moment wtrysku określany jest przez układ sterujący na podstawie impulsów elektrycznych z układu zapłonowego. Sygnał sterujący wyznaczający czas otwarcia

wtryskiwacza ma charakter impulsu o pewnej długości czasowej, gdzie dłuższy impuls oznacza zwiększenie wtrysniętej dawki paliwa.



Rys. 5.1. Schemat strukturalny systemu sterowania typu Motronic [58]

gdzie: mikroprocesor (CPU), analogowo-cyfrowy przetwornik (A/D), układ formowania impulsów (IF), pamięć ROM, pamięć RAM, gdzie: WE1 - prędkość obrotowa, WE2 - objętość powietrza, WE3 - bieg jałowy, WE4 - temperatura cieczy chłodzącej, WE5 - temperatura zasysanego powietrza, WE6 - napięcie akumulatora, WE7 - napięcie sondy lambda, WY 1 - cewka zapłonowa, WY2 - wtryskiwacze, WY3 - pompa paliwa, WY4 - nastawnik biegu jałowego, WY5 - zawór odpowietrzania filtra z węglem aktywnym

Kolejne operacje wtryskiwania synchronizowane są z procesem roboczym silnika, a proces sterowania wtryskiem składa się z kilku następujących faz [25]:

- faza synchronizacji - pierwsza faza wyznaczająca chwilę początku wtrysku bazując na pomiarze położenia wału korbowego,
- faza strategii - w oparciu o warunki pracy silnika wybierana jest zadawana wartość współczynnika nadmiaru powietrza,
- faza kalkulacji - znając wartość zadanego składu mieszanki szacowana jest masa zasysanego powietrza w oparciu o wskazania różnych zestawów czujników pomiarowych (charakterystyka statyczna napełniania),

- faza korekcji – w której dokonywane jest dopasowanie czasu wtrysku zgodnie z aktualnym napięciem akumulatora,
- faza regulacji – końcowa faza obliczająca ilość mieszanki paliwa w procesie wtrysku na podstawie obecnych i wcześniejszych wskazaniach czujnika tlenu.

Elektroniczny sterownik silnika w oparciu o dane z powyższych faz określa optymalne warunki pracy dla wszystkich urządzeń wykonawczych układu sterownia. Warunki te określają wartości sygnałów sterujących (nastawników) dotyczących ogólnej sprawności silnika wyrażanej w odpowiednim zużyciu paliwa, mocy, emisji spalin, a także komfortu jazdy. W celu wyznaczenia takich warunków, potrzebne jest pozyskanie wielu parametrów stanu działania silnika uzyskanych z sygnałów czujników i nastawników wartości zadanych.

5.1.1 Stanowisko badawczo-laboratoryjne

Stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 5.2, opracowano na podstawie silnika o zapłonie iskrowym z systemem sterowania Motronic wraz z dodatkowym oprzyrządowaniem. Wykorzystano w tym celu naprawialny obiekt klasy analogowej przygotowany w Katedrze Energetyki Politechniki Koszalińskiej. Badany system umożliwia sterowanie pracą silnika w zakresie kąta wyprzedzania zapłonu oraz zmian dawki paliwa w zależności od takich parametrów jak temperatura, prędkość obrotowa obciążenie itp. [57].



Rys. 5.2. Stanowisko badawcze benzynowego silnika o zapłonie iskrowym z systemem sterowania Motronic 4.1

Stanowisko badawcze posiada w dolnej części wbudowane dwa pulpity z uniwersalnymi złączami diagnostycznymi. Pierwszy jest to pulpit pomiarowy, umożliwiający połączenie przyrządów pomiarowych do zwykłych czujników systemu podzespołów wykonawczych. Drugi to pulpit symulacji usterek, ułatwiający realizację stanów awaryjnych w wybranych obwodach oraz obserwację reakcji systemu sterowania na powstałą awarię. Możliwe jest wtedy obserwowanie bieżących parametrów systemu opracowanych przez sterownik, cyfrowych kodów usterek, bądź realizację funkcji odpowiedzi systemu na wymuszenie z przyrządu diagnostycznego w formie testu podzespołów.

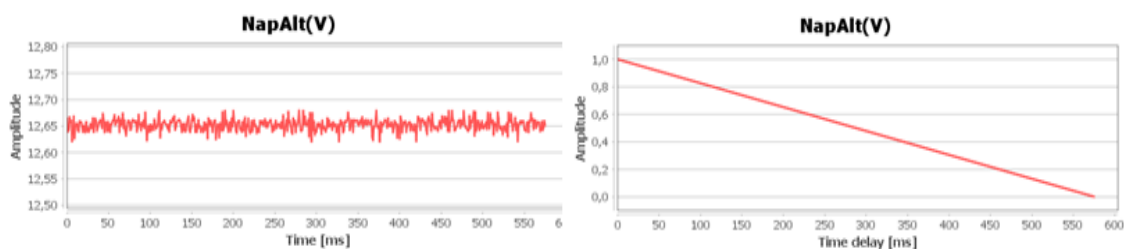
Zasilanie stanowiska odbywa się z sieci energetycznej 220V/50Hz poprzez transformator bezpieczeństwa. Wewnątrz stanowiska wbudowano zasilacz przekształcający napięcie przemiennie z transformatora bezpieczeństwa na napięcie stałe o wartości 13,6V. Ze względu na konieczność stosowania źródła zasilania o stosunkowo dużej wydajności prądowej zastosowano szereg zabezpieczeń.

5.1.2 Przetwarzanie informacji w urządzeniu sterującym

Zastosowanie techniki cyfrowej w układzie sterowania umożliwia przetwarzanie wielu zmiennych decyzyjnych równocześnie. Sterownik odbiera sygnały elektryczne od czujników i nadaje im określone poziomy wartości co pozwala wyznaczyć sygnały wyjściowe dla członów wykonawczych. Oprogramowanie sterownika zapisane jest w pamięci stałej, a sam program odczytywany i wykonywany jest przez mikroprocesor. Współpraca czujników dla nastawników układu oraz zasilanie sterownika odbywa się za pomocą złącza wielostykowego. Stopnie dużej mocy do bezpośredniego sterowania nastawnikami są tak wkomponowane w obudowę sterownika, aby zapewnić intensywne chłodzenie. Czujniki oraz nastawniki stanowią stopień pośredni między pojazdem, a sterownikiem. Elektryczne sygnały czujników są przesyłane do sterownika przewodami i złączem przewodowym. Sygnały te mogą mieć następującą postać [146]:

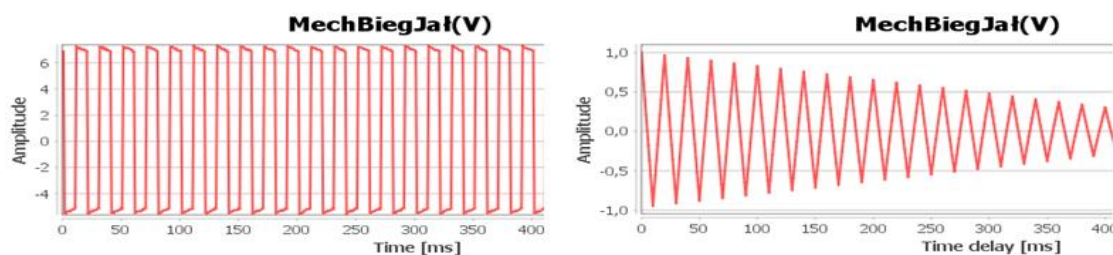
- sygnały analogowe, które zamieniane są na wartość napięcia z określonego przedziału. Przykładowymi wielkościami fizycznymi, które występują jako sygnały analogowe są między innymi: masowy wydatek powietrza, napięcie akumulatora, napięcie alternatora, ciśnienie w kolektorze dolotowym, ciśnienie doładowania, temperatura chłodziwa, temperatura powietrza itp. Są one przetwarzane w przetworniku A/C (analogowo-cyfrowym) na sygnały cyfrowe,

które służą do dalszych obliczeń w jednostce centralnej. Maksymalna rozdzielczość tych sygnałów to 5 [mV], a zakres pomiarowy od 0 do 5 [V],



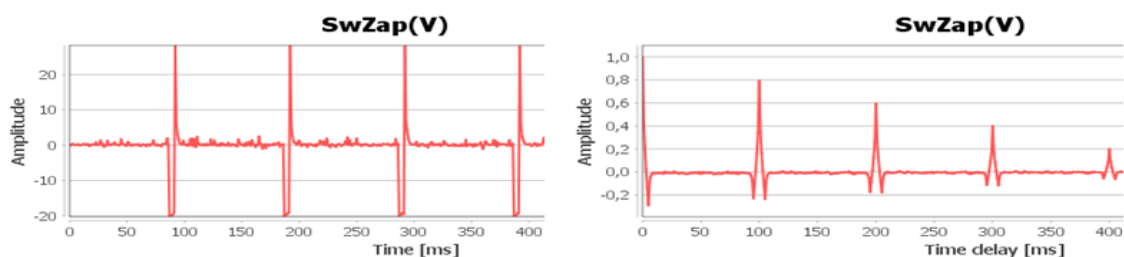
Rys. 5.3. Przykładowy sygnał przedstawiający napięcie na wyjściu alternatora w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2

- sygnały cyfrowe występują tylko w dwóch stanach: wysokim (high, logiczna 1) i niskim (low, logiczne 0). Przykładowymi sygnałami cyfrowymi są przełączniki on/off (włączone – wyłączony) albo cyfrowe sygnały czujnika prędkości obrotowej i czujnika Halla. Sygnały cyfrowe mogą być przetwarzane bezpośrednio w mikroprocesorze,



Rys. 5.4. Przykładowy sygnał sterowania mechanizmem biegu jałowego w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2

- sygnały impulsowe czujników indukcyjnych z informacją o liczbie obrotów i ze znakami odniesienia przetwarzane są w specjalnym układzie wewnątrz sterownika. Po odrzuceniu impulsów z zakłóceniami, sygnały zamieniane są na cyfrowe przebiegi prostokątne.



Rys. 5.5. Przykładowy sygnał wyjściowy świecy zapłonowej w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2

Napięcie sygnałów wejściowych ograniczane jest do dopuszczalnego zakresu za pomocą układów zabezpieczających. Sygnały użyteczne uwalniane są za pomocą filtrowania od nakładających się na nie sygnałów zakłócających, a następnie wzmacniane do dopuszczalnego zakresu napięcia tj. 0-5[V]. W zależności od stopnia integracji układów scalonych obróbka sygnału może być realizowana częściowo lub całkowicie w samym czujniku. Sygnały z czujników przesyłane są do sterownika łączami np. (magistralą CAN) i są w nim odpowiednio przetwarzane za pomocą algorytmów w celu wygenerowania sygnałów wyjściowych dla nastawników.

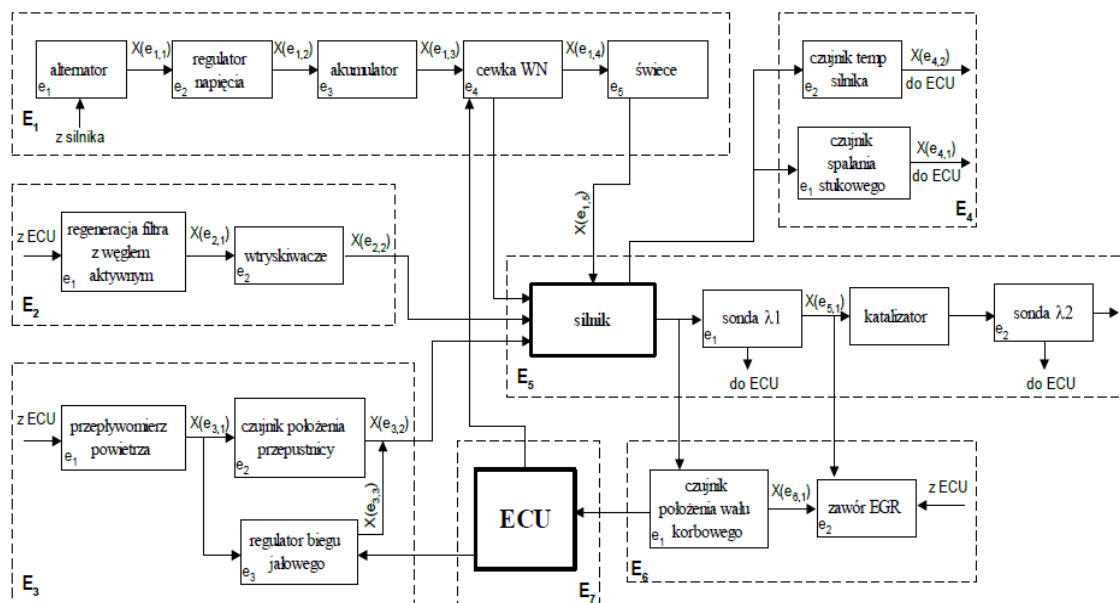
Cyfrowe sygnały wyjściowe generowane są najczęściej jako sygnały PWM (ang. Pulse Width Modulation) z modulacją szerokości impulsów [143]. Mają one z reguły postać przebiegów prostokątnych o stałej częstotliwości i zmiennym wypełnieniu. Taka postać sygnału pozwala na ustawienie urządzenia wykonawczego w dowolne położenie robocze. Mikrokontroler steruje sygnałami wyjściowymi stopni końcowych, które dostarczają wystarczającej mocy do urządzeń wykonawczych. W przypadku szczególnie dużego zapotrzebowaniu mocy stopień wyjściowy może wysterować przełącznik. Każdy stopień końcowy (wyjściowy) chroniony jest przed wystąpieniem zwarcia lub zakłócenia spowodowanego przeciążeniami elektrycznymi lub termicznymi. Takie zakłócenia, jak również rozłączenia przewodów są przez stopnie wyjściowe obwodów scalonych rozpoznawane jako błąd. Sygnały łączy powodują włączenie lub wyłączenie urządzeń wykonawczych (np. wentylatora chłodnicy).

5.2 Opracowanie diagnostyczne systemu sterowania pracą silnika o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1

Zanim przejdziemy do badania stanu obiektu należy dokonać opracowania diagnostycznego pozwalającego wyznaczyć strukturę wewnętrzną obiektu i zbiór badanych sygnałów diagnostycznych. Działania te realizowane są w kilku etapach, w których dokonujemy dekompozycji obiektu na cztery poziomy struktury obsługowej szczegółowo opisanej w rozdziale 3. Do głównych etapów tego procesu możemy zaliczyć: opracowanie struktury funkcjonalno-diagnostycznej obiektu, zdefiniowanie listy zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych oraz wyznaczenie struktury wewnętrznej w postaci tabelarycznej określającej zbiór sygnałów diagnostycznych.

5.2.1 Schemat funkcjonalno-diagnostyczny

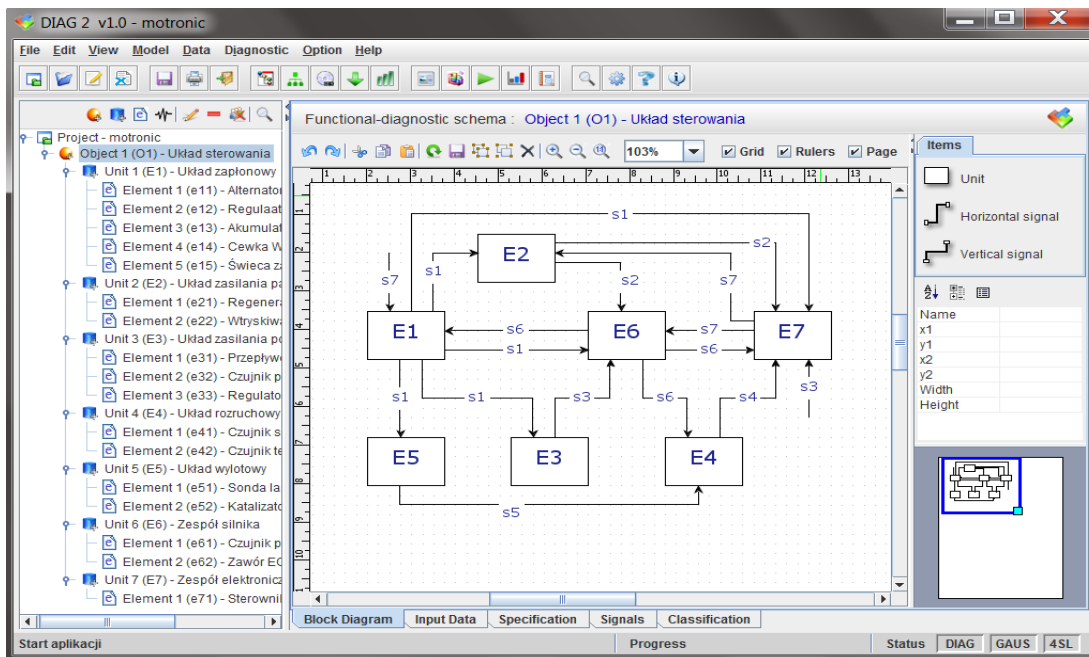
Pierwszym etapem opracowania diagnostycznego jest utworzenie struktury obiektu technicznego i jego schematu funkcjonalno-diagnostycznego. na podstawie którego możemy wyznaczyć zbiór sygnałów diagnostycznych. Szczegółowy schemat systemu sterowania silnikiem o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1 przedstawiono na rysunku 5.6 [2]. Zawiera on poszczególne elementy obiektu pogrupowane w zespoły oraz kierunki przepływu sygnałów pomiędzy tymi elementami. Wyznaczone sygnały możemy analizować na poziomie zespołów funkcjonalnych jak i samych elementów podstawowych, określających różny poziomy struktury obsługowej.



Rys. 5.6. Schemat funkcjonalno-diagnostyczny elektronicznego systemu sterowania pracą benzynowego silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1 [57]

gdzie: E1 – układ zapłonowy, E2 – układ zasilania paliwem, E3 – układ zasilania powietrzem, E4 – układ rozruchowy, E5 – układ zasilania elektrycznego, E6 – zespół silnika, E7 – zespół elektronicznego sterowania

W badanym obiekcie wykorzystano naprawialny obiekt techniczny klasy analogowej, którego struktura wewnętrzna składa się z siedmiu zespołów funkcjonalnych (E_1, E_2, \dots, E_7) różnych klas, w tym mechanicznej, elektronicznej, mechatronicznej itp. W każdym z zespołów wyróżniono do pięciu elementów podstawowych $e_{i,j}$. Na podstawie schematu wyznaczono wymagany zbiór sygnałów diagnostycznych na wyjściu elementów podstawowych $\{X(e_{i,j})\}$, gdzie $e_{i,j}$ określa „adresowanie” elementu, j - wskazuje numer elementu w i -tym zespole obiektu.



Rys. 5.7. Panel programu DIAG 2 ze strukturą funkcjonalno-diagnostyczną systemu sterowania pracą silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic M.4.1 [3]

Uproszczoną strukturę funkcjonalno-diagnostyczną zorientowaną na poziomie zespołów funkcjonalnych utworzoną w programie DIAG 2 przedstawiono na rysunku 5.7. Zawiera on siedem zespołów funkcjonalnych zgodnie z pełnym schematem przedstawionym na rysunku 5.6, a także relacje pomiędzy nimi w postaci ukierunkowanych sygnałów. Tak uproszczona struktura pozwala na łatwiejsze projektowanie wyższych warstw z punktu widzenia całego obiektu. Wszystkie pliki z danymi dotyczącymi struktury omawianego projektu jak i samych pomiarów znajdują się w katalogu „data”. W celu uruchomienia projektu należy wybrać z menu opcję „Open project”, a następnie w otwartym oknie dialogowym zaznaczyć plik Motronic_Engine_Control.xml.

5.2.2 Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych

Etapem pośrednim między utworzeniem schematu funkcjonalno-diagnostycznego, a wyznaczeniem struktury wewnętrznej obiektu jest zdefiniowanie listy zespołów funkcjonalnych i należących do nich elementów podstawowych.

W schemacie funkcjonalno-diagnostycznym przedstawionym na rysunkach 5.6 i 5.7 zdefiniowano siedem zespołów funkcjonalnych o różnej liczbie elementów podstawowych. Na wyjściu każdego elementu określono sygnał diagnostyczny określający stan danego elementu do realizacji działań zgodnie z jego założeniem. Pełną listę zespołów funkcjonalnych i należących do nich elementów podstawowych

przedstawiono w tabeli 5.1. Zawiera ona siedemnaście sygnałów $X_{i,j}$ przypisanych pojedynczo do każdego elementu $e_{i,j}$. Określone na podstawie listy wektory zawierające zbiór wartości sygnałów pomiarowych i zbiór wartości sygnałów wzorcowych stanowią pomiarową bazę wiedzy badanego silnika samochodowego typu Motonic 4.1 [64]. Dostęp do opisywanej powyżej listy w programie DIAG 2 uzyskujemy po przełączeniu na panel „Specification”. Domyślnie jest on niewidoczny dopóki nie wprowadzimy i zaakceptujemy danych pomiarowych. Wszystkie symbole przypisane do elementów jak i sygnałów generowane są automatycznie według zadanego wzorca z indeksem rosnącym.

Tabela 5.1. Lista zespołów funkcjonalnych i zbiór elementów podstawowych badanego obiektu wyznaczonych w opracowaniu diagnostycznym

Zespoły obiektu		Elementy podstawowe obiektu		Sygnały	
Symbol	Nazwa	Symbol	Nazwa	Symbol	[V]
E ₁	układ zapłonowy	e _{1,1}	alternator	X _{1,1}	12
		e _{1,2}	regulator napięcia	X _{1,2}	12
		e _{1,3}	akumulator	X _{1,3}	12
		e _{1,4}	cewka WN	X _{1,4}	48
		e _{1,5}	świeca zapłonowa	X _{1,5}	48
E ₂	układ zasilania paliwem	e _{2,1}	regeneracja filtra z węglem aktywnym	X _{2,1}	14
		e _{2,2}	wtryskiwacz	X _{2,2}	48
E ₃	układ zasilania powietrzem	e _{3,1}	przepływomierz powietrza	X _{3,1}	0,1÷4,9
		e _{3,2}	czujnik położenia przepustnicy	X _{3,2}	0,1÷4,8
		e _{3,3}	regulator biegu jałowego	X _{3,3}	0,1÷14
E ₄	układ rozruchowy	e _{4,1}	czujnik spalania stukowego	X _{4,1}	3
		e _{4,2}	czujnik temperatury cieczy chłodzącej	X _{4,2}	0,5÷4,8
E ₅	układ wylotowy	e _{5,1}	sonda lambda	X _{5,1}	0,1÷1
		e _{5,2}	katalizator	X _{5,2}	0,1÷1
E ₆	zespół silnika	e _{6,1}	czujnik indukcyjny położenia i prędkości wału korbowego	X _{6,1}	1÷99
		e _{6,2}	zawór EGR	X _{6,2}	1÷12
E ₇	układ elektronicznego sterowania	e _{7,1}	komputer pokładowy (sterownik)	X _{7,1}	5

Z analizy struktury obiektu przedstawionej na rysunku 5.6 i tabeli 5.1 możemy zauważyć, że w zespołach funkcjonalnych oprócz czujników znajdują się elementy wykonawcze. Po otrzymaniu i przetworzeniu odpowiednich sygnałów wejściowych elektroniczne urządzenie sterujące ECU wysyła sygnał sterujący do elementów wykonawczych znajdujących się w zespołach funkcjonalnych, Do głównych elementów wykonawczych możemy zaliczyć:

- cewkę zapłonową (E₁) zapewniającą wytworzenie dostatecznie silnej iskry zapłonowej, we właściwej chwili,
- elektryczną pompę paliwa (E₂) w każdym stanie pracy silnika doprowadzającą ilość paliwa wystarczającego do dawkowania wtrysku pod odpowiednim

ciśnieniem. Tylko podczas rozruchu i pracy silnika pompa jest zasilana prądem przez przełącznik sterujący. Przy braku sygnału sterującego przełącznik przerywa dopływ prądu ze względów bezpieczeństwa. W układach wielopunktowego wtrysku benzyny paliwo jest wtryskiwane do komory spalania przez elektromagnetyczne wtryskiwacze sterowane elektronicznie.

- zawór suwakowy (E_3) zwiększa ilość powietrza przy prędkości obrotowej biegu jałowego i w fazie nagrzewania silnika, w celu zrekompensowania większych oporów tarcia,
- wtryskiwacz rozruchowy (E_4) wtryskuje dodatkową ilość paliwa do kolektora dolotowego podczas rozruchu zimnego silnika w celu wyrównania strat kondensacji paliwa i ułatwia rozruch,
- zawór EGR (E_6) przekierowuje część spalin do układu dolotowego silnika obniżając zawartość tlenu dostarczonego do komory spalania co pozwala na redukcję emisji szkodliwych substancji w spalinach.

Elementy wykonawcze znajdują się głównie jako jedne z końcowych elementów należących do poszczególnych zespołów funkcjonalnych. Pełnią rolę tzw. regulatorów, których wadliwe działanie może mieć wpływ nie tylko na zespół funkcjonalny w którym się znajdują ale również na pracę całego silnika.

5.2.3 Dane pomiarowe symulacji

Symulowany silnik pracował z prędkością obrotową wynoszącą 2300 obr/min, w temperaturze 20°C przy zamkniętym styczniku biegu jałowego oraz częściowym obciążeniem. Potencjometry symulacji pracy sondy lambda umożliwiające regulację częstotliwości zmian symulowanego napięcia sondy oraz zmianę współczynnika wypełnienia impulsu ustawione zostały na minimum. Przełącznik rezystancji oktanowych przełączono na paliwo 95 oktanowe. Do rejestracji mierzonych wielkości wykorzystano multimetr skanujący RIGOL M302MM. Uzyskane dane pomiarowe w trakcie symulacji pracy silnika benzynowego dla opisanego stanowiska pomiarowego zapisane zostały przez multimetr w plikach o formacie CVS. Fragment takiego pliku otwartego w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel przedstawiono na rysunku 5.8. Wewnątrz pliku pomierzone dane umieszczone zostały w postaci kolumn przypisanych pojedynczo do sygnałów i oddzielonych od siebie przecinkiem. Każdy rekord zawiera wartość pojedynczej próbki dla wszystkich sygnałów mierzonych jednocześnie.

Pierwszy rekord (wiersz) pliku określa etykiety przypisane do sygnałów, a kolejne rekordy zawierają wartości próbek indeksowanych n-1, gdzie n określa numer rekordu w pliku. Podczas odczytu danych wymagana jest równa liczba próbek zawarta w poszczególnych kolumnach dla wszystkich sygnałów. Pierwsze dwie kolumny określają numer porządkowy i czas pomiaru. Dane pomiarowe sygnałów diagnostycznych rozpoczynają się dopiero od trzeciej kolumny. Należy o tym pamiętać podczas manualnej modyfikacji zawartości pliku w edytorze plików CSV.

B5 f_x 2018-11-17 12:29:41:146

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	No.	Time	NapAlt(V)	RegNap(V)	NapAku(V)	CewkaZap	SwZap(V)	RegFiltraW
2	1	2018-11-17 12:29:41:143	12.628559409351514	14.633072936549476	12.648854947376524	0.2904099	0.3809410	13.421275
3	2	2018-11-17 12:29:41:144	12.609067219828601	14.695929416940446	12.549835330376471	0.2765280	0.5029573	13.342082
4	3	2018-11-17 12:29:41:145	12.605433308199544	14.568874816939308	12.577628534327763	0.3955447	-0.014870	13.381765
5	4	2018-11-17 12:29:41:146	12.57468053535973	14.63120521072288	12.58106017701688	0.4247708	0.2109759	13.363878
6	5	2018-11-17 12:29:41:147	12.643282915750254	14.520591872591698	12.385855379918858	0.3204815	0.3114349	13.413918
7	6	2018-11-17 12:29:41:148	12.583567972135285	14.682819656149402	12.511747350653152	1.4909423	0.2748772	13.439435
8	7	2018-11-17 12:29:41:149	12.631171215233776	14.70351053514264	12.585128446927312	0.3924606	0.4408225	13.413526
9	8	2018-11-17 12:29:41:150	12.630507207616018	14.616782206183148	12.509174012226431	0.4148329	0.1987662	13.420826
10	9	2018-11-17 12:29:41:151	12.657054044318125	14.67063375532175	12.526838445599896	0.2042604	-0.114485	13.432040
11	10	2018-11-17 12:29:41:152	12.598315180804946	14.68654704238739	12.51568160140039	0.2344427	0.1819337	13.435065

Rys. 5.8. Fragment danych symulacji pracy silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1 edytowany w arkuszu kalkulacyjnym

Pełne pliki z danymi znajdują się w katalogu „data” programu DIAG 2. Dane pomiarowe zapisano w pliku o nazwie diagnostics_Motronic.csv i umieszczono w podkatalogu „data/diagnostic_samples”. Plik ten zawiera wartości 712 próbek dla każdego z siedemnastu sygnałów mierzonych co 1 [ms]. Natomiast dane nominalne (wzorcowe) umieszczono w pliku o nazwie „nominals_Motronic.csv” znajdującym się w podkatalogu „nominal_samples”. W pliku tym zapisano dane 576 próbek również dla siedemnastu sygnałów, mierzonych z odstępem 1 [ms].

5.2.4 Struktura wewnętrzna i zbiór sygnałów diagnostycznych

Kolejnym etapem w procesie diagnostycznym po wyznaczeniu listy sygnałów przypisanych do elementów podstawowych, jest wygenerowanie struktury wewnętrznej badanego obiektu. Przedstawiona w tabeli 5.2 struktura wewnętrzna systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym podzielona została na siedem rekordów reprezentujących poszczególne zespoły funkcjonalne. Zdefiniowana liczba siedemnastu elementów podstawowych przyporządkowana została do odpowiednich rekordów (zespołów). Liczba elementów w poszczególnych zespołach nie jest równomierna

i wacha się od pięciu w układzie zapłonowym E_1 do jednego w układzie elektronicznego sterowania E_7 . Po dwa elementy podstawowe występują aż w czterech zespołach funkcjonalnych tj. układ zasilania paliwem E_2 , układ rozruchowy E_4 , układ wylotowy E_5 i zespół silnika E_6 . Tak przyjęta postać podziału struktury obsługowej obiektu zapewnia wygodny sposób opisywania (adresowania) elementów tej struktury.

Tabela 5.2. Struktura wewnętrzna systemu sterowania pracą benzynowego silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic M.4.1 [2]

Zespoły obiektu	Elementy podstawowe obiektu $\{X(e_{i,j})\}$				
E_1	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
E_1	$e_{1,1}$	$e_{1,2}$	$e_{1,3}$	$e_{1,4}$	$e_{1,5}$
E_2	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
E_3	$e_{3,1}$	$e_{3,2}$	$e_{3,3}$	\emptyset	\emptyset
E_4	$e_{4,1}$	$e_{4,2}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
E_5	$e_{5,1}$	$e_{5,2}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
E_6	$e_{6,1}$	$e_{6,2}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset
E_7	$e_{7,1}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

Wyznaczony w strukturze wewnętrznej zbiór elementów jest podstawą do zestawienia w postaci tablicowej zbioru sygnałów diagnostycznych. Uzyskane wartości sygnałów pomiarowych przedstawiono w tabeli 5.3, a wartości sygnałów wzorcowych w tabeli 5.4.

Tabela 5.3. Zestawienie sygnałów pomiarowych obiektu przedstawionego na rysunku 5.6 [2]

Obiekt	Zespoły obiektu E_i	Wektor pomiarowych sygnałów diagnostycznych $[X(e_{i,j})]$				
		e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
0	E_1	12,608	14,601	12,543	29,425	27,006
	E_2	13,401	49,037	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_3	5,195	4,906	7,199	\emptyset	\emptyset
	E_4	1,806	4,897	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_5	0,963	0,92	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_6	2,613	14,328	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_7	5,119	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

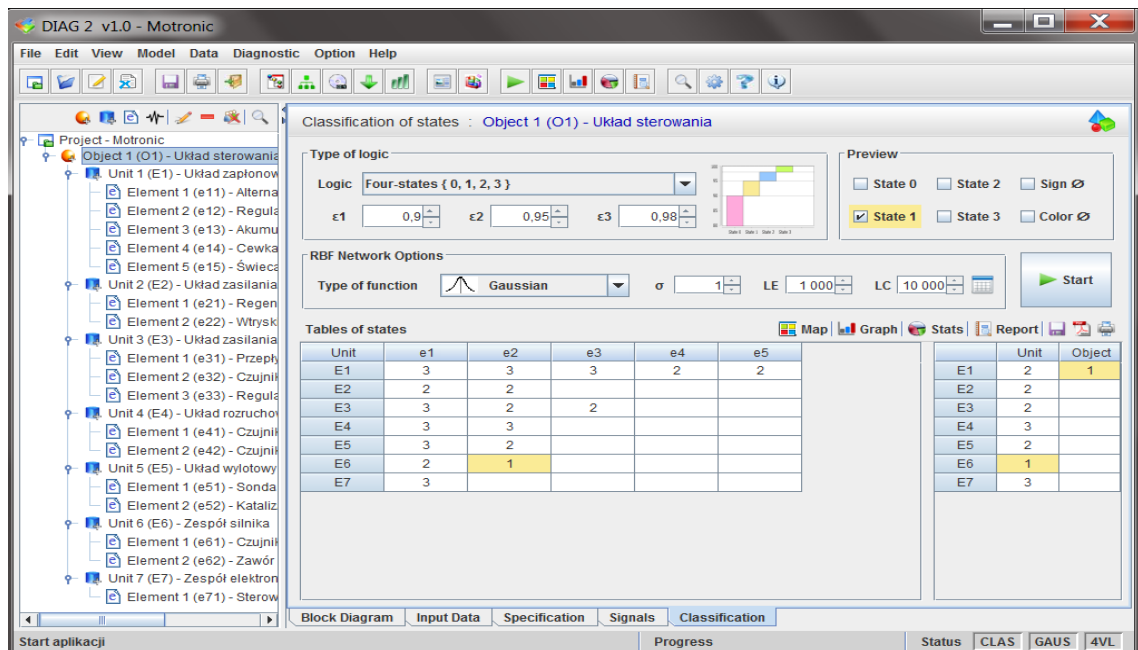
Tabela 5.4. Zestawienie sygnałów wzorcowych obiektu przedstawionego na rysunku 5.6.[2]

Obiekt	Zespoły obiektu E_i	Wektor wzorcowych sygnałów diagnostycznych $[X_w(e_{i,j})]$				
		e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
0	E_1	12,651	14,7	12,847	28,002	28,007
	E_2	14	48,207	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_3	4,91	4,901	7,306	\emptyset	\emptyset
	E_4	1,693	4,974	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_5	1,007	1	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_6	2,624	13,952	\emptyset	\emptyset	\emptyset
	E_7	4,979	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

Dostęp do tabel 5.2-5.4 w programie DIAG 2 uzyskujemy po wybraniu panelu „Signals”. Domyślnie jest on niewidoczny dopóki nie wprowadzimy i zaakceptujemy danych pomiarowych.

5.3 Wnioskowanie stanów obiektu

Proces klasyfikacji zrealizowano oddzielnie dla każdej k-wartościowej logiki stanów z tą samą konfiguracją programu. Jako dane wejściowe zastosowano wektory wartości sygnałów diagnostycznych elementów podstawowych zawartych w strukturze wewnętrznej przedstawionej w tabelach 5.3-5.4.



Rys. 5.9. Tabele stanów uzyskane w procesie klasyfikacji systemu sterowania silnikiem samochodowym typu Motronic dla czterowartościowej oceny stanów [2]

Wynikowe tablice stanów uzyskano dla tych samych przedziałów zmian charakteryzujących daną logikę i zgodnych z rysunkiem 2.5. Przyjęte stany obiektu dla logiki wielowartościowej określono w polskich normach dotyczących niezawodności i jakości obsługi [134]. Stanom obiektu po klasyfikacji przypisano zbiór symboli $\{0,1\}$ dla logiki dwuwartościowej, $\{0,1,2\}$, dla logiki trójwartościowej i $\{0,1,2,3\}$ dla logiki czterowartościowej. Każdy kolejny realizowany proces klasyfikacji dla zmienionego typu logiki odbywał się po wcześniejszym zapisaniu uzyskanych wyników.

Mapę stanów dla danych pomiarowych z tabeli 5.3 i 5.4, uzyskaną w procesie klasyfikacji przy czterowartościowej ocenie stanu zaprezentowano na rysunku 5.9 Składa się ona z dwóch tablic, a mianowicie: pierwszej (po lewej) przedstawiającej stany elementów podstawowych obiektu oraz drugiej (po prawej) opisująca stan obiektu i jego zespołów funkcjonalnych. Wyznaczone wartości stanów określone zostały na podstawie reguł klasyfikacji 3.23-3.24, gdzie stan zespołu funkcjonalnego równy jest najniższemu stanowi jego elementów podstawowych, natomiast stan obiektu określa najniższy stan zespołu funkcjonalnego.

Dla czterowartościowej oceny stanów uzyskano pięć elementów będących w stanie częściowej zdatności „2”, dwa elementy w stanie krytycznej zdatności „1” i żadnego w stanie niezdatności (awarii) „0”. Elementy z częściową zdatnością cechują się uszkodzeniami parametrycznymi spowodowanymi oddziaływaniem kumulujących się bodźców, występowaniem procesu starzenia lub zużywania obiektu. Do grupy tej możemy zaliczyć:

- akumulator $e_{1,3}$ w układzie zapłonowym E_1 ,
- wtryskiwacz $e_{2,2}$ w układzie zasilania paliwem E_2 ,
- czujnik położenia przepustnicy $e_{3,2}$ i regulator biegu jałowego $e_{3,3}$ w układzie zasilania powietrzem E_3
- sonda lambda $e_{5,1}$ w układzie wylotowym E_4 .

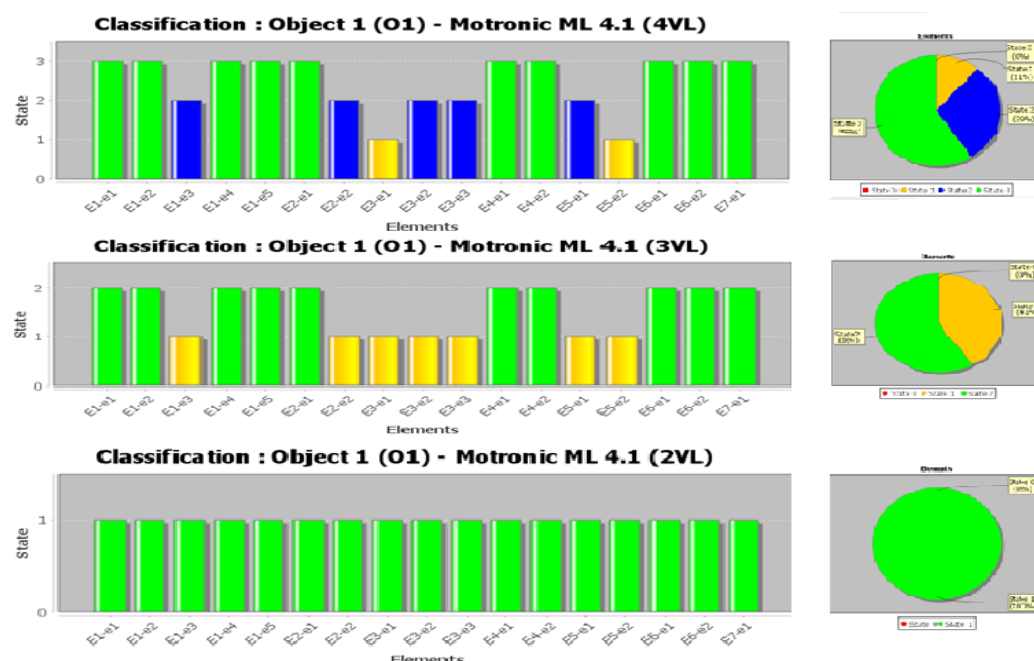
Aż trzy z nich są powiązane z dwoma elementami w stanie krytycznej zdatności występujących w tych samych zespołach funkcjonalnych. Elementy w stanie krytycznej zdatności cechują się uszkodzeniem przed katastroficznym co oznacza możliwość losowej i nagłej utraty ich zdolności do wykonywania zadań zgodnie z przeznaczeniem. Do elementów tych zaliczamy:

- przepływomierz powietrza $e_{3,1}$ w układzie zasilania powietrzem E_3
- katalizator $e_{5,2}$ w układzie wylotowym E_5 .

W celu wymuszenia stanu krytycznej zdatności włączono przełączniki symulacji awarii potencjometru ilości zasysanego powietrza oraz awarii w obwodzie sondy lambda. Wystąpienie dwóch zespołów funkcjonalnych E_3 i E_5 w tym stanie powoduje, że według reguły 3.24 badany obiekt jest również w stanie krytycznej zdatności i powinien zostać poddany procesowi odnowy cech eksploatacyjnych. Zastosowanie czterowartościowej oceny stanów umożliwia zatem dostarczenie informacji, w której zbiór elementów $\{e_{1,3}, e_{2,2}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{5,1}\}$ wymaga jedynie dostrojenia (wyregulowania), a poddanie procesowi odnowy dotyczy tylko dwóch elementów $\{e_{3,1}, e_{5,2}\}$.

5.4 Ocena stanu diagnostycznego systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1

Porównanie zbiorczej klasyfikacji systemu sterowania silnikiem benzynowym typu Motronic ML 4.1 dla wyznaczonego zbioru sygnałów diagnostycznych oraz przyjętej logiki dwu, trój i czterowartościowej przedstawiono na rysunku 5.10. Wykresy umieszczone po lewej stronie tzw. histogramy zawierają wartości stanów 17 sygnałów diagnostycznych dla elementów podstawowych obiektu. Natomiast wykresy kołowe z prawej strony informują nas o procentowej liczbie wystąpienia poszczególnych stanów w stosunku do całkowitej liczby elementów podstawowych obiektu.



Rys. 5.10. Porównanie wyników klasyfikacji dla logiki dwu, trzy i czterowartościowej układu sterowania silnikiem o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1 [2]

gdzie: 4VL - wnioskowanie w logice czterowartościowej, 3VL - wnioskowanie w logice trójwartościowej, 2VL - wnioskowanie w logice dwuwartościowej.

Analiza wykresów klasyfikacji stanów przedstawionych na rysunku 5.10 jednoznacznie ukazuje przewagę logiki wielowartościowej nad logiką dwuwartościową. W rzeczywistości z punktu widzenia działań obsługowych obiektu, interesują nas głównie stany pośrednie uprzedzające wystąpienie stanu niezdatności "0". Wnoszą one dodatkową informację o stanie obiektu, która wpływa na planowanie i decyzję podejmowania działań obsługowych. Dla opisywanych powyżej danych pomiarowych przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej w wielowartościowych ocenach stanów przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej w logice trzy i cztero-wartościowej dla układu sterowania silnikiem o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1

Logika	Stan	Unity		Elementy	
4VL	"3"	3	42%	10	58%
	"2"	2	29%	5	30%
	"1"	2	29%	2	12%
	"0"	0	0%	0	0%
3VL	"2"	3	42%	10	59%
	"1"	4	58%	7	41%
	"0"	0	0%	0	0%
2VL	"1"	7	100%	17	100%
	"0"	0	0%	0	0%

Z analizy rysunku 5.10 i tabeli 5.5 wynika, że ilość informacji diagnostycznej o stanie elementów obiektu uzyskanej w procesie klasyfikacji z logiką dwuwartościową jest niewystarczająca. Zarówno wszystkie elementy jak i zespoły funkcjonalne są w stanie zdatności (100%) co nie pozwala na zdiagnozowanie stanów pośrednich w celu uniknięcia uszkodzeń katastroficznych (awarii). Wszystkie elementy podstawowe badanego obiektu działają prawidłowo lub nie nadają się do użycia. Dopiero dodanie dodatkowego stanu pośredniego w logice trójwartościowej umożliwia nam określenie elementów podstawowych obiektu będących w stanie niepełnej zdatności. W badanym powyżej przypadku, 7 z 17 (41%) diagnozowanych elementów podstawowych silnika samochodowego jest w stanie pośrednim. Dotyczy to takich elementów jak: akumulator $e_{1,3}$, wtryskiwacz $e_{2,2}$, przepływomierz powietrza $e_{3,1}$, czujnik położenia przepustnicy $e_{3,2}$, czujnik spalania stukowego, $e_{3,3}$, sonda lambda $e_{5,1}$, oraz katalizator $e_{5,2}$. Elementy

te występują w aż 4 z 7 (58%) zespołów funkcjonalnych, które również przyjmują stan niepełnej zdadności. Należące do tej grupy układy: zapłonowy E_1 , zasilania paliwem E_2 , zasilania powietrzem E_3 i wylotowy E_4 stanowią ponad połowę wszystkich zespołów w obiekcie. Ponieważ nie znamy stopnia uszkodzeń to wszystkie te elementy ze stanem pośrednim powinny zostać niezwłocznie poddane procesowi odnowy.

Wprowadzając czwarty stan zdadności krytycznej, uzyskujemy dodatkową informację dla stanów pośrednich. Dostarczenie dodatkowej informacji przez zastosowanie logiki czterowartościowej znacząco zmienia klasyfikacje stanów zespołów funkcjonalnych w stosunku do logiki trójwartościowej. Poprzez dodanie stanu niepełnej zdadności "2" określamy uszkodzenia parametryczne zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych. Dotyczą one głównie rozregulowań, rozstrojeń, zaniżania wartości parametrów obiektu itp., co umożliwia ich łatwe usunięcie za pomocą prostych napraw i regulacji. Liczba elementów podstawowych obiektu w stanie niepełnej zdadności dla logiki czterowartościowej zmniejsza się z 7 do 5 $\{e_{1,3}, e_{2,2}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{5,1}\}$ co stanowi 71% elementów w stanie niezdatności występujących w logice trójwartościowej. Pozostałe 29% to elementy $\{e_{3,1}, e_{5,2}\}$ znajdujące się w dodatkowym stanie krytycznej zdadności "1". Natomiast dla zespołów funkcjonalnych aż 2 z 4 $\{E_3, E_5\}$ znajduje się w stanie krytycznym, co wprowadza dodatkową informację dotyczącą 50% tych zespołów. Dla całości możemy również zauważyć że 2 elementy z 17 (12%) i 2 zespoły funkcjonalne z 7 (29%) dostarczają informacji o dodatkowym stanie zdadności krytycznej. Jeżeli przyjmiemy strategię odnowy elementów tylko w stanie krytycznym to procesowi temu poddane zostaną tylko dwa elementy podstawowe $\{e_{3,1}, e_{5,2}\}$ z dwóch zespołów funkcjonalnych $\{E_3, E_5\}$. Pomimo, że koszt realizacji procesu klasyfikacji obiektu dla logiki trzy i czterowartościowej w programie diagnostycznym jest zbliżony to dodatkowy stan wprowadza większą dokładność w ocenie jego elementów składowych.

Tabela 5.6. Efektywność profilaktycznego obsługiwanian technicznego w logice trzy i czterowartościowej dla układu sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1

k	Logika	Elementy			
		$A_k(t)$	$\lambda[\%]$	$E_{pot}(k)$	$\lambda[\%]$
4	4VL	0,69	68	3,12	84
3	3VL	0,41	41	1,69	69
2	2VL	0		1	

Wyznaczone współczynniki rodzaju niezdatności i efektywności profilaktycznej obsługi dla k-wartościowej oceny stanu ($k = 2,3,4$) przedstawiono w tabeli 5.6. Dla obydwu współczynników uzyskane wartości praktyczne oscylują wokół wyznaczonych wartości teoretycznych. Wprowadzenie czwartego stanu powoduje wzrost współczynnika rodzaju niezdatności o 68%, z wartości $A_3(t) = 0,41$ do $A_4(t) = 0,69$ i jest on większy od wartości teoretycznej wyznaczonej w rozdziale 2.

$$A_4(t) > A_{teor,4}(t) = 0,66 \quad (5.1)$$

Natomiast średni czas w którym przeprowadza się obsługiwane profilaktyczne w stosunku do logiki trójwartościowej wzrósł o 84%, z wartości $E_{pot}(3) = 1,69$ do $E_{pot}(4) = 3,12$ i również jest większy od wartości teoretycznej.

$$E_{pot}(4) > E_{pot,teor}(4) = 3 \quad (5.2)$$

Przedstawione powyżej wskaźniki w ocenie diagnostycznej jednoznacznie wskazują, że wprowadzenie dodatkowego stanu krytycznej zdatności pozwala zmniejszyć liczbę wystąpień stanu niezdatności (awarii) i wydłużyć za pomocą profilaktycznych obsługiwanych technicznych przeciętny czas bezawaryjnej pracy obiektu.

5.5 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono praktyczną weryfikację założeń teoretycznych dotyczących procesu diagnozowania urządzenia elektronicznego systemu sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1. Na wstępie opisano stanowisko badawczo-laboratoryjne oraz omówiono przetwarzanie informacji w urządzeniu sterującym. W dalszej części rozdziału przeprowadzono proces diagnostyczny badanego obiektu w oparciu o wielowartościową ocenę stanów dla $k = \{2,3,4\}$. W ramach tego procesu zrealizowano takie czynności jak:

- określono model funkcjonalno-diagnostyczny oparty na czterech poziomach struktury obsługowej, z których wyodrębniono siedem zespołów funkcjonalnych i siedemnaście elementów podstawowych.
- wyodrębniono zbiór sygnałów pomiarowych przypisanych do poszczególnych elementów struktury obiektu,
- wyznaczono tabelę stanów elementów podstawowych i zespołów funkcjonalnych obiektu w procesie wnioskowania dla k-wartościowej oceny stanów, gdzie $k=\{2,3,4\}$.

Na koniec rozdziału omówiono uzyskane wyniki z procesu wnioskowania i dokonano ich porównania z logiką trójwartościową w aspekcie uzyskania dodatkowej informacji. Wprowadzenie nowego stanu pozwoliło na wyodrębnienie uszkodzeń parametrycznych i krytycznych w stanach pośrednich. Dotyczyło to aż 5/7 (71%) elementów i 2/4 (50%) zespołów funkcjonalnych) w stosunku do logiki trójwartościowej. Wyznaczone współczynniki rodzaju niezdatności $A_4(t)=0,68$ i średniego czasu w którym przeprowadza się obsługiwane profilaktyczne $E_{pot}(4)=3,12$ były zbliżone do wartości teoretycznych.

6 Diagnostowanie urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy

W niniejszym rozdziale dokonana zostanie praktyczna weryfikacja założeń teoretycznych dotyczących procesu diagnostowania dla urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy. Na początku scharakteryzowane zostanie stanowisko badawczo-laboratoryjne, a w dalszej części rozdziału przeprowadzony zostanie proces diagnostyczny z wyznaczeniem struktury funkcjonalno-diagnostycznej i bazy sygnałów pomiarowych. Na koniec zaprezentowane zostaną uzyskane wyniki z procesu wnioskowania i ich porównanie dla różnej liczby stanów $k = \{2,3,4\}$ w logikach wielowartościowych.

6.1 Stanowisko badawczo-laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne do badania diagnostyki urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy przedstawione na rysunku 6.1, zostało opracowane w Katedrze Energetyki Politechniki Koszalińskiej.

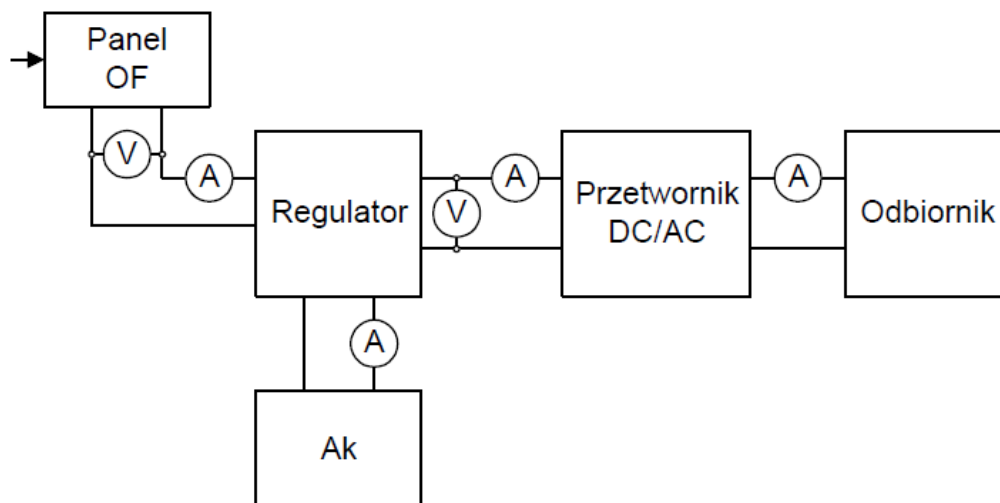


Rys. 6.1. Stanowisko laboratoryjne do badania urządzeń elektrowni słonecznej małej mocy [56]

Przedstawiona powyżej elektrownia słoneczna małej mocy pracuje w połączeniu z układem gromadzenia (magazynem) energii elektrycznej przez baterie akumulatorów. System zasilania elektrycznego zaprojektowany został z wykorzystaniem monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych typu FLEX -02 340 o mocy

znamionowej 340 W. Panele zamontowane zostały na konstrukcjach wspornych na dachu budynku. Podział i rozmieszczenie ogniw wykonano z uwzględnieniem elementów zacieniających. Wytworzona przez panele fotowoltaiczne energia elektryczna odprowadzana jest poprzez kable solarne o przekroju 6mm^2 do bloku gromadzenia energii, składającego się z dwóch akumulatorów 12 V. Zanim energia dotrze do akumulatorów zmieniana jest do postaci DC 12/24 V w regulatorze napięcia, w którym kontrolę nad wszystkimi parametrami ładowania sprawuje nowoczesny mikroprocesor [56].

Wszystkie dane sterujące prezentowane są na wyświetlaczu LCD, a poszczególne stany pracy urządzenia sygnalizowane są za pomocą diod LED na panelu przednim. Sterownik posiada wyjście sterujące (REMOTE), umożliwiające wysterowanie zewnętrznego urządzenia o regulowanych progach „załłącz/wyłącz” w zależności od stopnia naładowania akumulatora. Do urządzeń zewnętrznych możemy zaliczyć między innymi stycznik, inwerter 230V lub bezpośrednie obciążenie nie przekraczające dopuszczalnej obciążalności wyjścia. Energia o postaci DC z bloku akumulatorów jest transformowana do falownika trójfazowego zasilającego pompę ciepła oraz do przetwornicy (falownika) Multiplus DC/AC 12V/5000/120-50, gdzie energia zamieniana jest na prąd przemienny jednofazowy o napięciu 230V/50Hz i przesyłana dalej do instalacji elektrycznej.



Rys. 6.21. Schemat układu pomiarowego do badania elektrowni słonecznej małej mocy [56]

gdzie: panel OF – ogniwo fotowoltaiczne, Ak – akumulator, A – amperomierz,

V - woltomierz

Schemat obwodu elektrycznego systemu zasilania małej elektrowni słonecznej przedstawiono na rysunku 6.2. Obwód baterii słonecznej zamykany jest przez regulator, prąd zwarcia I mierzony jest przez amperomierz A , a napięcie na wyjściu układu U przez woltomierz V . Układ funkcjonalny takiej elektrowni posiada następujące elementy składowe [39]:

- generator PV - moduły fotowoltaiczne typu FLEX -02 340,
- baterie akumulatorów 2 szt. 12 V,
- sterownik stanu ładowania akumulatorów,
- obciążenie stałoprądowe (DC),
- falownik i obciążenie zmiennoprądowe (AC).

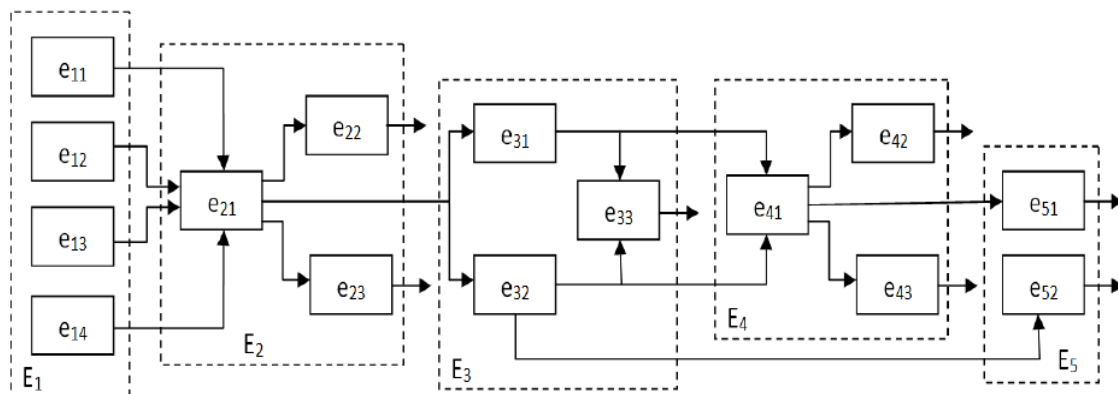
System fotowoltaiczny to instalacja, która wyposażona jest w odpowiednią grupę urządzeń PV umożliwiających wykorzystanie energii słonecznej na wyprodukowanie energii elektrycznej. Moduły PV znajdują się w systemie On-Grid i posiadają certyfikat zgodności z normą PN-EN 61215.

6.2 Opracowanie diagnostyczne urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy

Rozpoczęcie badania stanu obiektu wymaga wcześniejszej realizacji opracowania diagnostycznego pozwalającego na wyznaczenie struktury wewnętrznej obiektu i zbioru badanych sygnałów diagnostycznych. Przyjęte do realizacji działania dotyczą takich czynności jak dekompozycja obiektu na cztery poziomy struktury obsługowej, opracowanie struktury funkcjonalno-diagnostycznej, zdefiniowanie listy zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych oraz wyznaczenie struktury wewnętrznej w postaci tabelarycznej określającej zbiór sygnałów diagnostycznych.

6.2.1 Schemat funkcjonalno-diagnostyczny

Jednym z pierwszych etapów opracowania diagnostycznego jest utworzenie struktury obiektu technicznego i jego schematu funkcjonalno-diagnostycznego. Szczegółowy schemat urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy przedstawiono na rysunku 6.3. Zawiera on elementy podstawowe obiektu pogrupowane w zespoły funkcjonalne oraz kierunki przepływu sygnałów pomiędzy tymi elementami.



Rys. 6.2. Schemat funkcjonalno-diagnostyczny urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy

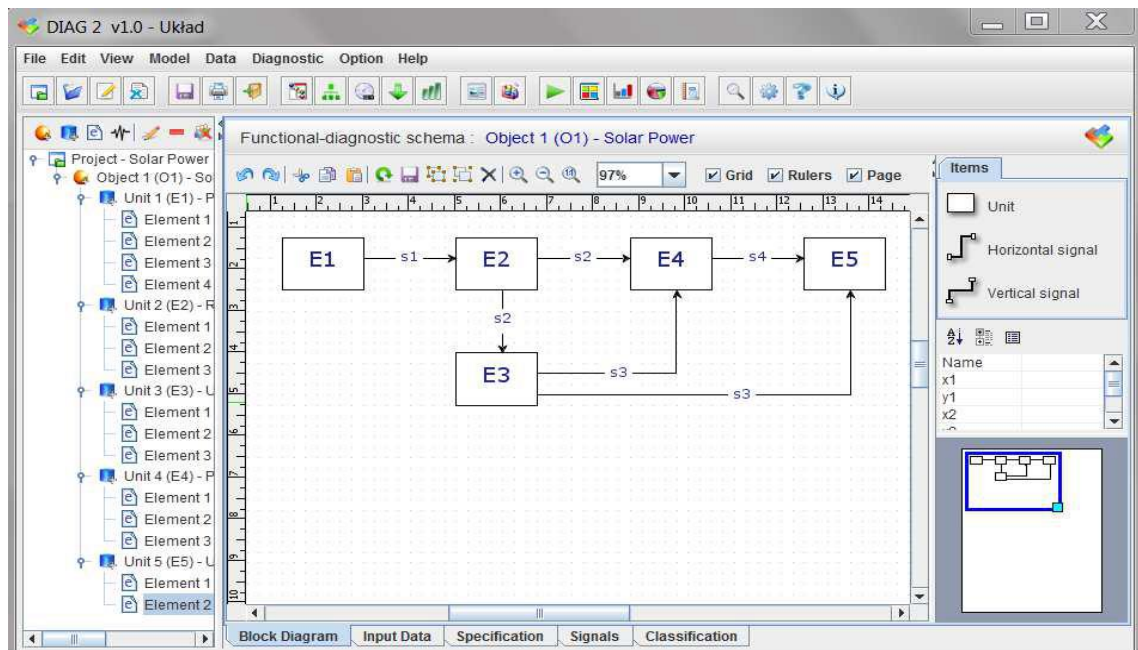
gdzie: E_1 – układ fotowoltaiczny, E_2 – układ regulatora napięcia (sterownika),

E_3 – układ gromadzący energię elektryczną, E_4 – przetwornik DC/AC,

E_5 – układ odbiorczy

W badanym obiekcie wykorzystano naprawialny obiekt techniczny klasy analogowej, którego struktura wewnętrzna składa się z pięciu zespołów funkcjonalnych (E_1, E_2, \dots, E_5) różnych klas, w tym elektronicznej, elektrotechnicznej itp. W każdym z zespołów E_i wyróżniono do czterech elementów podstawowych $e_{i,j}$. Na podstawie schematu wyznaczono wymagany zbiór sygnałów diagnostycznych na wyjściu elementów podstawowych $\{X(e_{i,j})\}$, gdzie $e_{i,j}$ określa „adresowanie” elementu,; j - wskazuje numer elementu w i -tym zespole obiektu.

Uproszczoną strukturę funkcjonalno-diagnostyczną zorientowaną na poziomie zespołów funkcjonalnych utworzoną w programie DIAG 2 przedstawiono na rysunku 6.4. Zawiera on pięć zespołów funkcjonalnych zgodnych z pełnym schematem przedstawionym na rysunku 6.3, a także relacje pomiędzy nimi w postaci ukierunkowanych sygnałów. Tak uproszczona struktura pozwala na łatwiejsze projektowanie wyższych warstw z punktu widzenia całego obiektu. Wszystkie pliki z danymi dotyczącymi struktury omawianego projektu jak i samych pomiarów znajdują się w katalogu „data”. W celu uruchomienia projektu należy wybrać z menu opcję „Open project”, a następnie w otwartym oknie dialogowym zaznaczyć plik Solar_Power.xml. Po otwarciu projektu zarówno struktura hierarchiczna projektu jak i schemat funkcjonalno-diagnostyczny obiektu zostaną automatycznie umieszczone w poszczególnych oknach aplikacji.



Rys. 6.3. Panel programu DIAG 2 ze strukturą funkcjonalno-diagnostyczną urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy

Panel „Block Diagram” jest w pełni zsynchronizowany ze strukturą hierarchiczną obiektu przedstawionego w lewym panelu okna aplikacji. Modyfikację „Edit” elementów schematu można przeprowadzić nie tylko w edytorze graficznym ale również w oknie struktury projektu. Po utworzeniu schematu funkcjonalno-diagnostycznego możemy przejść do kolejnego etapu dotyczącego określenia listy sygnałów na wyjściu elementów podstawowych.

6.2.2 Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych

Etapem pośrednim między utworzeniem schematu funkcjonalno-diagnostycznego, a wyznaczeniem struktury wewnętrznej obiektu jest zdefiniowanie listy zespołów funkcjonalnych i należących do nich elementów podstawowych. W schemacie funkcjonalno-diagnostycznym przedstawionym na rysunkach 6.3 i 6.4 zdefiniowano pięć zespołów funkcjonalnych o różnej liczbie elementów podstawowych. Na wyjściu każdego elementu określono sygnał diagnostyczny opisujący stan danego elementu do realizacji działań zgodnie z jego założeniem. Pełną listę zespołów funkcjonalnych i należących do nich elementów podstawowych zestawiono w tabeli 6.1.

Określone na podstawie listy wektory zawierające zbiór wartości sygnałów pomiarowych i zbiór wartości sygnałów wzorcowych stanowią pomiarową bazę wiedzy urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy [23].

Tabela 6.1. Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych oraz przypisanych do nich sygnałów diagnostycznych [56]

Zespoły obiektu		Elementy podstawowe obiektu		Sygnały diagnostyczne w j-tych elementach
Symbol	Nazwa zespołu	Symbol	Nazwa elementu obiektu	
E ₁	układ fotowoltaiczny	e _{1,1}	moduł PV nr 1	X(e _{1,1})
		e _{1,2}	moduł PV nr 2	X(e _{1,2})
		e _{1,3}	moduł PV nr 3	X(e _{1,3})
		e _{1,4}	moduł PV nr 4	X(e _{1,4})
E ₂	układ regulatora napięcia (sterownika)	e _{2,1}	regulatora napięcia (sterownika)	X(e _{2,1})
		e _{2,2}	układ pomiaru napięcia	X(e _{2,2})
		e _{2,3}	układ pomiaru natężenia prądu	X(e _{2,3})
E ₃	układ gromadzący energię elektryczną	e _{3,1}	akumulator nr 1	X(e _{3,1})
		e _{3,2}	akumulator nr 2	X(e _{3,2})
		e _{3,3}	układ pomiaru natężenia prądu	X(e _{3,3})
E ₄	przetwornik DC/AC	e _{4,1}	falownik (zespół PWM)	X(e _{4,1})
		e _{4,2}	układ pomiaru napięcia	X(e _{4,2})
		e _{4,3}	układ pomiaru natężenia prądu	X(e _{4,3})
E ₅	układ odbiorczy	e _{5,1}	odbiornik nr 1	X(e _{5,1})
		e _{5,2}	odbiornik nr 2	X(e _{5,2})

Dostęp do opisywanej powyżej listy w programie DIAG 2 uzyskujemy po przełączeniu się na panel „Specification”. Domyślnie jest on niewidoczny dopóki nie wprowadzimy i zaakceptujemy danych pomiarowych.

6.2.3 Dane pomiarowe symulacji

Symulowane urządzenie elektrowni słonecznej pracowało z modułami PV – FLEX-02-340W o ustawionym azymucie 56,0° i kącie pochylenia 10°. Do badań przyjęto lokalizację dla danych meteorologicznych w Koszalinie, a akumulatory 5x24 V/200Ah połączono równolegle w blok akumulatorów o pojemności 1000 Ah.

Do rejestracji mierzonych wielkości wykorzystano multimetr skanujący RIGOLM302MM. Uzyskane dane w trakcie symulacji pracy urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy dla opisanego stanowiska pomiarowego zapisane zostały przez multimetr w plikach o formacie CVS. Fragment takiego pliku otwartego w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel przedstawiono na rysunku 6.5. Wewnątrz pliku pomierzone

dane umieszczone zostały w postaci kolumn przypisanych pojedynczo do sygnałów i oddzielonych od siebie przecinkiem. Każdy rekord zawiera wartość pojedynczej próbki dla wszystkich sygnałów mierzonych jednocześnie. Pierwszy rekord pliku określa etykiety przypisane do sygnałów, a kolejne rekordy zawierają wartości próbek indeksowanych n-1, gdzie n określa numer rekordu w pliku.

C21 11.95625539623445

	A	B	C	D	E	F	G
1	No.	Time	ModulePV1(V)	ModulePV	ModulePV3(V)	ModulePV4(V)	Regulator(V)
2	1	2019-08-12 09:39:26:157	12.05537010497498	12.218742	11.980086383507347	12.088060002078635	12.165412409
3	2	2019-08-12 09:39:26:158	11.997452654792049	12.140397	11.976803803316962	12.214157623742985	12.137776775
4	3	2019-08-12 09:39:26:159	11.979870100819202	12.226819	11.974733928654706	12.199372863865255	12.210847054
5	4	2019-08-12 09:39:26:160	11.954938696867604	12.215016	11.914827292383801	12.101690079484582	12.168196188
6	5	2019-08-12 09:39:26:161	11.966000370211978	12.199436	12.040454693874826	12.080941867403235	12.210566043
7	6	2019-08-12 09:39:26:162	11.998504763819328	12.121830	11.911830794147855	12.071667704840555	12.123740954
8	7	2019-08-12 09:39:26:163	11.993652073898343	12.176309	12.017331021904432	12.147421068415737	12.182108742
9	8	2019-08-12 09:39:26:164	12.022293700056805	12.230010	11.913996746835558	12.140744197026606	12.209434525
10	9	2019-08-12 09:39:26:165	11.989092293172833	12.179353	11.968849717221598	12.105954576673058	12.218786378
11	10	2019-08-12 09:39:26:166	11.997686736303894	12.247573	11.911701201717346	12.097090491042247	12.198255931
12	11	2019-08-12 09:39:26:167	12.004379924830072	12.306820	11.910342739305007	12.120173170582909	12.288944101
13	12	2019-08-12 09:39:26:168	12.059809473332011	12.210126	11.915855738588634	12.127634370925078	12.171518229
14	13	2019-08-12 09:39:26:169	11.976376578304606	12.226110	11.944378528606798	12.120433992178308	12.198963044

Rys. 6.5. Fragment danych symulacji pracy urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy edytowany w arkuszu kalkulacyjnym

Pełne pliki z danymi znajdują się w katalogu „data” programu DIAG 2. Dane pomiarowe zapisano w pliku o nazwie diagnostics_Solar.csv i umieszczono w podkatalogu „data/diagnostic_samples”. Plik ten zawiera wartości 674 próbek dla każdego z piętnastu sygnałów mierzonych co 1 [ms]. Natomiast dane nominalne (wzorcowe) umieszczono w pliku o nazwie „nominals_Solar.csv” znajdującym się w podkatalogu „nominal_samples”. W pliku tym zapisano dane 487 próbek również dla piętnastu sygnałów, mierzonych z odstępem 1 [ms].

6.2.4 Struktura wewnętrzna i zbiór sygnałów diagnostycznych

Kolejnym etapem w procesie diagnostycznym po wyznaczeniu listy sygnałów przypisanych do elementów podstawowych, jest wygenerowanie struktury wewnętrznej badanego obiektu. Przedstawiona w tabeli 6.2 struktura wewnętrzna urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy podzielona została na pięć rekordów odpowiadających poszczególnym zespołom funkcjonalnym. Zdefiniowana liczba piętnastu elementów podstawowych przypisana została do zespołów funkcjonalnych odpowiadających rekordom tabeli. Liczba elementów w poszczególnych zespołach nie jest równomierna i waha się od czterech w układzie fotowoltaicznym E₁ do dwóch w układzie odbiorczym E₅. Po trzy elementy występują aż w trzech zespołach funkcjonalnych tj. układ regulatora napięcia E₂, układ gromadzący energię elektryczną

E_3 i układ przetwornika AC/DC E_4 . Tak przyjęta postać podziału struktury obsługowej obiektu zapewnia wygodny sposób adresowania elementów tej struktury.

Tabela 6.2. Struktura wewnętrzna urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy [56]

Zespoły obiektu	Elementy podstawowe obiektu $\{e_{i,j}\}$			
E_i	e_1	e_2	e_3	e_4
E_1	$e_{1,1}$	$e_{1,2}$	$e_{1,3}$	$e_{1,4}$
E_2	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$e_{2,3}$	\emptyset
E_3	$e_{3,1}$	$e_{3,2}$	$e_{3,3}$	\emptyset
E_4	$e_{4,1}$	$e_{4,2}$	$e_{4,3}$	\emptyset
E_5	$e_{5,1}$	$e_{5,2}$	\emptyset	\emptyset

Wyznaczony w strukturze wewnętrznej zbiór elementów jest podstawą do zestawienia w postaci tablicowej zbioru sygnałów diagnostycznych. Uzyskane wartości sygnałów pomiarowych i wzorcowych przedstawiono w tabelach 6.3- 6.4.

Tabela 6.3. Zestawienie sygnałów pomiarowych obiektu przedstawionego na rysunku 6.3

Zespoły obiektu	Elementy podstawowe obiektu $\{e_{i,j}\}$			
E_i	e_1	e_2	e_3	e_4
E_1	11,98	12,21	11,96	12,12
E_2	12,2	12,4	2,84	\emptyset
E_3	11,8	12,25	2	\emptyset
E_4	224	223,1	4,72	\emptyset
E_5	226	11,7	\emptyset	\emptyset

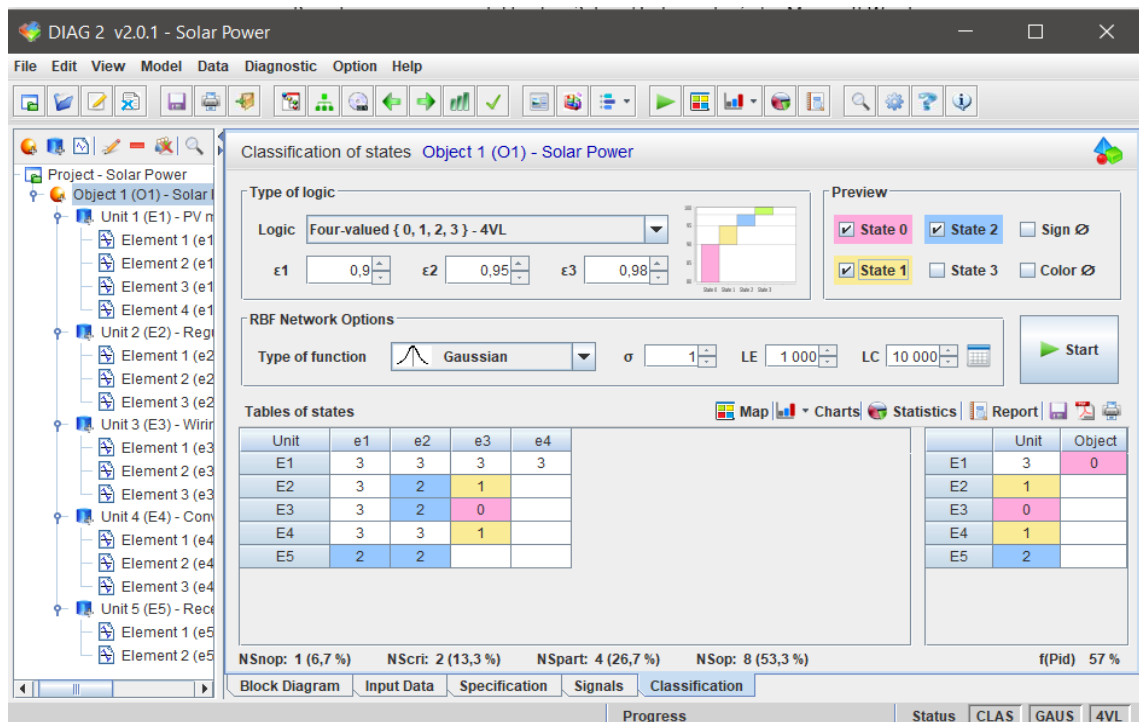
Tabela 6.4. Tablica sygnałów wzorcowych obiektu przedstawionego na rysunku 6.3

Zespoły obiektu	Wartości sygnałów wzorcowych $\{X_{(w)}(e_{i,j})\}$ obiektu			
E_i	e_1	e_2	e_3	e_4
E_1	11,7÷12,4	11,7÷12,4	11,7÷12,4	11,7÷12,4
E_2	11,7÷12,4	11,7÷12,4	1÷4	\emptyset
E_3	11,7÷12,4	11,7÷12,4	0,5÷4	\emptyset
E_4	220÷235	220÷235	0,5÷10	\emptyset
E_5	220÷235	11,7÷12,4	\emptyset	\emptyset

Dostęp do tabel 6.2-6.4 w programie DIAG 2 uzyskujemy po wybraniu panelu „Signals”. Domyślnie jest on niewidoczny dopóki nie wprowadzimy i zaakceptujemy danych pomiarowych.

6.3 Wnioskowanie stanu obiektu

Po wyznaczeniu struktury wewnętrznej obiektu i bazy sygnałów pomiarowych przechodzimy do etapu wnioskowania w celu określenia stanu elementów i zespołów funkcjonalnych. Etap ten w postaci procesu klasyfikacji zrealizowano oddzielnie dla każdej k-wartościowej logiki stanów z tą samą konfiguracją programu. Jako dane wejściowe zastosowano wektory wartości sygnałów diagnostycznych elementów podstawowych zawartych w strukturze wewnętrznej przedstawionej w tabelach 6.3-6.4. Końcowe tablice stanów otrzymano dla tych samych przedziałów zmian charakteryzujących daną logikę i zgodnych z rysunkiem 2.5. Przyjęte stany obiektu dla logiki wielowartościowej określono w polskich normach dotyczących niezawodności i jakości obsługi [134]. Stanom obiektu po klasyfikacji przypisano zbiór symboli {0,1} dla logiki dwuwartościowej, {0,1,2}, dla logiki trójwartościowej i {0,1,2,3} dla logiki czterowartościowej. Każdy realizowany proces klasyfikacji dla zmienionego typu logiki odbywał się dla tych samych danych wejściowych.



Rys. 6.6. Tabele stanów uzyskane w procesie klasyfikacji urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy dla czterowartościowej oceny stanów

Mapę stanów dla danych pomiarowych z tabeli 6.3 i 6.4, uzyskaną w procesie klasyfikacji przy czterowartościowej ocenie stanu zaprezentowano na rysunku 6.6 Składa się ona z dwóch tablic: lewej przedstawiającej stany elementów podstawowych obiektu oraz prawej opisującej stan obiektu i jego zespołów funkcjonalnych. Wyznaczone wartości stanów określone zostały na podstawie reguł klasyfikacji 3.23-3.24.

Dla czterowartościowej oceny stanów uzyskano cztery elementy będące w stanie częściowej zdatności „2”, dwa w stanie krytycznej zdatności „1” i jeden w stanie niezdatności „0”. Elementy podstawowe z częściową zdatnością cechują się uszkodzeniami parametrycznymi spowodowanymi oddziaływaniem kumulujących się bodźców, występowaniem procesu starzenia lub zużycia obiektu. Do grupy tej możemy zaliczyć:

- układ pomiaru napięcia ($e_{2,2}$) w regulatorze napięcia E_2
- akumulator nr 2 ($e_{3,2}$) w układzie gromadzącym energię elektryczną E_3
- odbiornik nr 1 i 2 ($e_{5,1}$, $e_{5,2}$) w układzie odbiorczym E_5

Tylko jeden z nich jest powiązany z dwoma elementami w stanie krytycznej zdatności występujących w tych samych zespołach funkcjonalnych. Elementy w stanie krytycznej zdatności cechują się uszkodzeniem przed katastroficznym co oznacza możliwość nagłej utraty zdolności do wykonywania zadań zgodnie z przeznaczeniem. Do elementów tych zaliczamy:

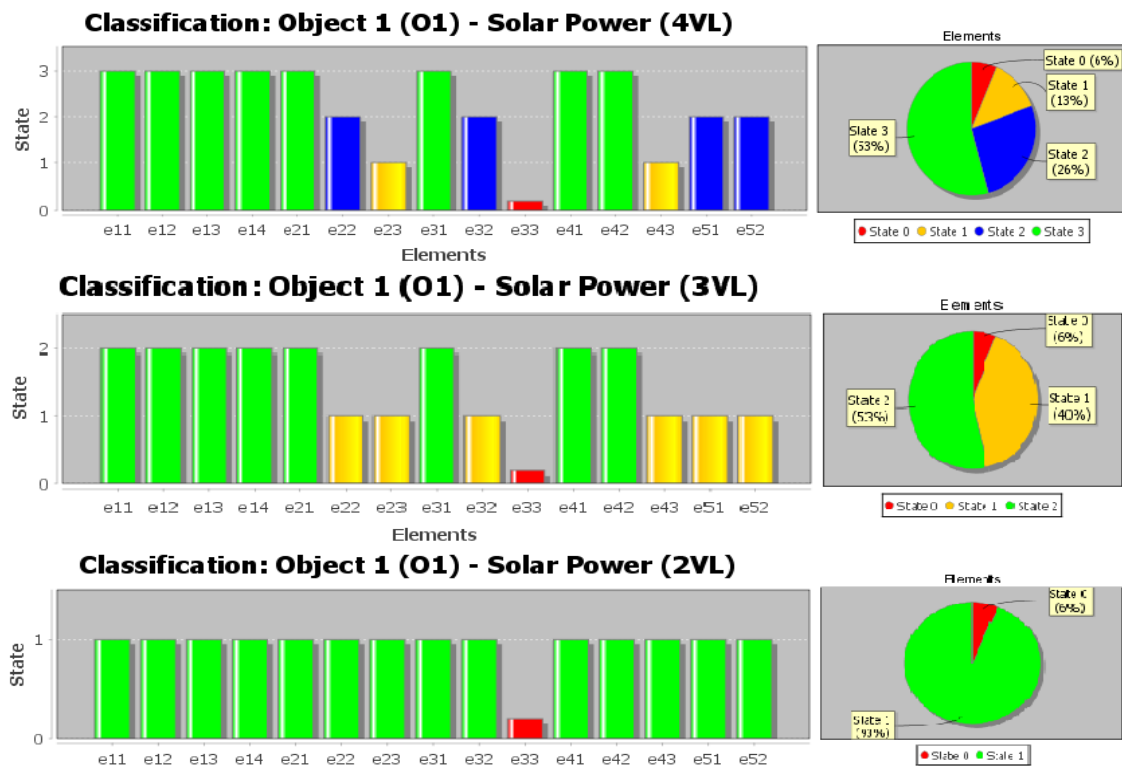
- układ pomiaru natężenia prądu ($e_{2,3}$) w regulatorze napięcia E_2
- układ pomiaru natężenia prądu ($e_{4,3}$) w przetworniku AC/DC E_4

Tylko jeden z elementów znajdował się w stanie katastroficznym, a mianowicie układ pomiaru natężenia prądu ($e_{3,3}$) w module gromadzącym energię elektryczną E_3

W celu wymuszenia stanu krytycznej zdatności i niezdatności zasymulowano usterkę w układach natężenia prądu w zespołach $\{E_2, E_3, E_4\}$. Wystąpienie jednego zespołu funkcjonalnego E_4 w stanie niezdatności powoduje, że według reguły 3.24 badany obiekt jest również w stanie niezdatności i powinien zostać poddany procesowi odnowy cech eksploatacyjnych. Zastosowanie czterowartościowej oceny stanów umożliwia zatem dostarczenie informacji, w której zbiór elementów $\{e_{2,2}, e_{3,2}, e_{5,1}, e_{5,2}\}$ wymaga jedynie wyregulowania, a poddanie procesowi odnowy dotyczy tylko trzech elementów $\{e_{2,3}, e_{3,3}, e_{4,3}\}$.

6.4 Ocena stanu diagnostycznego elektrowni słonecznej małej mocy

Porównanie zbiorczej klasyfikacji urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy dla wyznaczonego zbioru sygnałów diagnostycznych oraz przyjętej logiki dwu, trój i czterowartościowej przedstawiono na rysunku 6.7.



Rys. 6.7. Porównanie wyników klasyfikacji dla logiki dwu, trzy i czterowartościowej urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy

gdzie: 4VL - wnioskowanie w logice czterowartościowej, 3VL - wnioskowanie w logice trójwartościowej, 2VL - wnioskowanie w logice dwuwartościowej

Wykresy umieszczone po lewej stronie zawierają wartości stanów 15 sygnałów diagnostycznych dla elementów podstawowych obiektu. Natomiast wykresy kołowe po prawej stronie informują nas o procentowej liczbie wystąpienia poszczególnych stanów w stosunku do całkowitej liczby elementów podstawowych obiektu.

Analiza wykresów klasyfikacji stanów przedstawionych na rysunku 6.6 jednoznacznie uwidacznia przewagę logiki wielowartościowej nad logiką dwuwartościową. Z punktu widzenia działań obsługowych, interesują nas głównie stany pośrednie wnoszące dodatkową informację o stanie obiektu, uprzedzającą wystąpienie stanu niezdatności. Dla opisywanych powyżej danych pomiarowych przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej w logikach wielowartościowych przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej w logice trzy i czterowartościowej dla elektrowni słonecznej małej mocy

Logic	State	Units		Elements	
4VL	"3"	1	20%	8	53%
	"2"	1	20%	4	26%
	"1"	2	40%	2	14%
	"0"	1	20%	1	7%
3VL	"2"	1	20%	8	53%
	"1"	3	60%	6	40%
	"0"	1	20%	1	7%
2VL	"1"	4	80%	14	93%
	"0"	1	20%	1	7%

Na podstawie rysunku 6.7 i tabeli 6.5 możemy zauważyć, że ilość informacji o stanie elementów obiektu uzyskanej w procesie klasyfikacji z logiką dwuwartościową jest niewystarczająca. Prawie wszystkie elementy oprócz układu pomiaru natężenia prądu ($e_{3,3}$) są w stanie zdatności (93%) co nie pozwala na zdiagnozowanie stanów pośrednich w celu uniknięcia uszkodzeń katastroficznych. Dopiero dodanie dodatkowego stanu pośredniego w logice trójwartościowej umożliwia określenie sześciu elementów podstawowych $\{e_{2,2}, e_{2,3}, e_{3,2}, e_{4,3}, e_{5,1}, e_{5,2}\}$ będących w stanie niepełnej zdatności, co wynosi 40% wszystkich elementów obiektu. Elementy te występują w aż 3 z 5 (60%) zespołów funkcjonalnych, które również przyjmują stan niepełnej zdatności. Należące do tej grupy układy: regulatora napięcia E_2 , przetwornika AC/DC E_4 i odbiorczy E_5 stanowią ponad połowę zespołów funkcjonalnych w obiekcie. Ponieważ nie znamy stopnia uszkodzeń to wszystkie te elementy ze stanem pośrednim powinny zostać niezwłocznie poddane procesowi odnowy.

Wprowadzając czwarty stan zdatności krytycznej, uzyskujemy dodatkową informację dla stanów pośrednich. Dostarczenie dodatkowej informacji przez zastosowanie logiki czterowartościowej znacząco zmienia klasyfikacje stanów zespołów funkcjonalnych w stosunku do logiki trójwartościowej. Liczba elementów podstawowych obiektu w stanie krytycznym dla logiki czterowartościowej dotyczy 2 z 15 (14%), a zespołów funkcjonalnych 2 z 5 (40%). Okazuje się, że 33% elementów ze stanem krytycznym zaklasyfikowanych jest w logice trójwartościowej do stanu niepełnej zdatności. Jeżeli przyjmujemy strategię odnowy elementów tylko w stanie

krytycznym lub niezdatności to procesowi temu poddane zostaną tylko trzy elementy podstawowe $\{e_{2,3}, e_{3,3}, e_{4,3}\}$ z trzech zespołów funkcjonalnych $\{E_2, E_3, E_4\}$. Pomimo, że koszt realizacji procesu klasyfikacji obiektu dla logiki trzy i czterowartościowej w programie diagnostycznym jest zbliżony to dodatkowy stan wprowadza większą dokładność w ocenie jego elementów składowych.

Tabela 6.6. Efektywność profilaktycznego obsługiwanian technicznego w logice trzy i czterowartościowej dla elektrowni słonecznej małej mocy

k	Logika	Elementy			
		$A_k(t)$	λ [%]	$E_{pot}(k)$	λ [%]
4	4VL	0,57	42	2,32	39
3	3VL	0,40	40	1,66	66
2	2VL	0		1	

Wyznaczone współczynniki rodzaju niezdatności i efektywności profilaktycznej obsługiwanian dla k-wartościowej oceny stanu ($k = 2,3,4$) przedstawiono w tabeli 6.6. Dla obydwu współczynników uzyskane wartości są nieznacznie mniejsze od wyznaczonych wartości teoretycznych. Wprowadzenie czwartego stanu powoduje wzrost współczynnika rodzaju niezdatności o 67%, z wartości $A_3(t) = 0,40$ do $A_4(t) = 0,57$ i jest on mniejszy od wartości teoretycznej wyznaczonej w rozdziale 2.6.3.

$$A_4(t) < A_{teor,4}(t) = 0,66 \quad (5.1)$$

Natomiast średni czas w którym przeprowadza się obsługiwanian profilaktyczne w stosunku do logiki trójwartościowej wzrósł o 40%, z wartości $E_{pot}(3) = 1,66$ do $E_{pot}(4) = 2,32$ i również jest mniejszy od wartości teoretycznej.

$$E_{pot}(4) < E_{pot,teor}(4) = 3 \quad (5.2)$$

Przedstawione powyżej wskaźniki w ocenie diagnostycznej są nieznacznie mniejsze od wartości teoretycznej z powodu wystąpienia stanu niezdatności w układzie pomiaru natężenia prądu ($e_{3,3}$). Pomimo tego, wprowadzenie dodatkowego stanu krytycznej zdatności pozwala zmniejszyć liczbę wystąpień stanu niezdatności i wydłużyć przeciętny czas bezawaryjnej pracy obiektu.

6.5 Podsumowanie

W obecnym rozdziale przedstawiono praktyczną weryfikację założeń teoretycznych dotyczących procesu diagnozowania urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy. Na wstępie opisano stanowisko badawczo-laboratoryjne, a w dalszej części rozdziału przeprowadzono proces diagnostyczny badanego obiektu w oparciu o k-wartościową ocenę stanów dla $k = \{2,3,4\}$. W ramach tego procesu określono model funkcjonalno-diagnostyczny w których wyodrębniono pięć zespołów funkcjonalnych i piętnaście elementów podstawowych. Następnie wyodrębniono zbiór sygnałów pomiarowych przypisanych do poszczególnych elementów struktury obiektu i na jego podstawie wyznaczono w procesie wnioskowania tabelę stanów dla k-wartościowej oceny, gdzie $k=\{2,3,4\}$.

Na koniec rozdziału omówiono uzyskane wyniki z procesu wnioskowania i dokonano ich porównania z logiką trójwartościową w aspekcie uzyskania dodatkowej informacji. Wprowadzenie nowego stanu pozwoliło na wyodrębnienie uszkodzeń parametrycznych i krytycznych w stanach pośrednich. Dotyczyło to aż 4/6 (66%) elementów i 1/3 (33%) zespołów funkcjonalnych) w stosunku do logiki trójwartościowej. Wyznaczone współczynniki rodzaju niezdatności $A_4(t)=0,57$ i średniego czasu w którym przeprowadza się obsługiwanie profilaktyczne $E_{pot}(4)=2,32$ były nieznacznie mniejsze od wartości teoretycznych.

7 Wnioski i kierunki dalszych badań

Poniższa praca stanowi próbę kompleksowego przedstawienia problemu diagnozowania złożonych obiektów technicznych z wykorzystaniem czterowartościowej oceny stanów. Ponieważ w literaturze ilość opracowań dotyczących zastosowania w procesie diagnozowania logiki k-wartościowej (dla $k > 3$) jest relatywnie mała, to w przyjętym podejściu skupiono się głównie na następujących zagadnieniach:

- Opracowanie metody badania (stanu zdatności i lokalizacji uszkodzeń) złożonych obiektów technicznych z wykorzystaniem czterowartościowej oceny stanów.
- Zaproponowanie wskaźników określających przyrost informacji diagnostycznej oraz przeciętnego czasu bezawaryjnej pracy obiektu w logice wielowartościowej.
- Zastosowanie komputerowego systemu diagnostycznego realizującego pełen proces analizy i wnioskowania stanu obiektu technicznego.
- Praktyczną weryfikację rozważań teoretycznych na przykładzie stanowisk pomiarowych reprezentujących obiekty różnych klas.

7.1 Wnioski naukowe

Przeprowadzone przez autora badania dotyczące zastosowania logiki czterowartościowej jako szczególnego przypadku logiki k-wartościowej wymagało opracowania teoretycznych zasad i reguł diagnozowania zgodnych z logikami dla $k < 4$. Na podstawie tych badań oraz po przeanalizowaniu uzyskanych rezultatów opracowano następujące wnioski:

1. Przeprowadzona analiza diagnostyki w dwu i trójwartościowej ocenie stanów jednoznacznie wykazała, że możliwe jest wykonanie opracowania diagnostycznego badanego obiektu z wykorzystaniem dodatkowego, czwartego stanu. Efektem takiego działania jest uzyskanie bazy wiedzy diagnostycznej (BWD) poprzez wyznaczenie zbioru przedziałów zadanych parametrów sygnałów diagnostycznych.
2. Na podstawie interpretacji obiektu technicznego oraz występujących w nim przedziałów zmian cech eksploatacyjnych, zdefiniowano zbiór czterech klas stanów w postaci: stanu zdatności „3”, stanu niepełnej zdatności „2”, stanu krytycznej zdatności „1” i stanu niezdatności „0”. Dla wyznaczonych stanów określono schemat klasyfikacji oraz możliwe kierunki ich zmian w obiekcie technicznym.

3. Opracowano model zmiany stanu cech eksploatacyjnych złożonego obiektu technicznego w logice czterowartościowej. Do opisu modelu przyjęto funkcję jakości użytkownika $F_c(t)$ jako wielkość najbardziej odzwierciedlającą własności użytkowe.
4. Opracowano reguły dekompozycji struktury wewnętrznej obiektu i przyjęto cztery poziomy podziału struktury obsługowej: poziom pierwszy - obiekt O, poziom drugi - zespoły funkcjonalne E_i w obiekcie, poziom trzeci - podzespoły e_j w każdym zespole E_i , oraz poziom czwarty - elementy podstawowe $e_{i,j}$ w każdym zespole obiektu.
5. Opisano postać analityczną równania realizującego w procesie diagnozowania zadanie porównywania obrazu wektora sygnału diagnostycznego z obrazem jego wektora sygnału wzorcowego.
6. Opracowano reguły wnioskowania diagnostycznego wypracowujące diagnozy wyrażone w jednej z czterech wyróżnionych stanów (3,2,1,0) dla poszczególnych elementów obiektu,
7. Przeprowadzono analizę uzysku informacyjnego, w której przedstawiono wskaźniki przyrostu informacji i efektywności obsługi obiektów w celu porównania diagnoz czterowartościowych z dwu i trójwartościową oceną stanów,
8. Wyznaczono, że miara ilości uzyskanej informacji dla elementarnego sygnału czwórkowego I_4 dostarcza 1,262 razy więcej informacji niż sygnał trójkowy I_3 oraz 2 razy więcej informacji od sygnału dwójkowego I_2 .
9. Porównanie wyznaczonej wartości miary ilości uzyskanej informacji dla sygnału czwórkowego z sygnałem trójkowym i dwójkowym wskazuje, że różnica w dostarczonej informacji pomiędzy kolejnymi stanami (dla $k>3$) ulega zmniejszeniu.
10. Wyznaczona wartość teoretyczna funkcji przyrostu informacji diagnostycznej $f(P_{\text{inf diag}})$ dla czterowartościowej oceny stanów obiektu pozwala uzyskać 50% przyrost w stosunku do oceny dwuwartościowej. W przypadku zastosowania trzech stanów przyrost wynosi 33%, więc dodanie czwartego stanu zwiększa uzysk dodatkowej informacji o 17%,
11. Zaproponowanie w diagnostyce 4VL czwartego stanu zdatności krytycznej „1” powoduje, że informacja diagnostyczna na potrzeby odnawiania badanego obiektu technicznego zwiększa trzykrotnie teoretyczną wartość przeciętnego czasu

bezwaryjnej pracy obiektu $E_{\text{pot}}(4) = 3$. Dla porównania w przypadku diagnoz trójstanowych wartość ta wynosi $E_{\text{pot}}(3) = 2$.

7.2 Wnioski uylitarne

W części praktycznej pracy przedstawiono weryfikację założeń teoretycznych dotyczących procesu diagnozowania w logice czterowartościowej. Uzyskane na etapie klasyfikacji rezultaty porównano z diagnozami dwu i trójwartościowymi oceny stanów w kontekście pozyskania dodatkowej informacji. W części tej zrealizowano następujące zadania:

1. Zbudowano dwa stanowiska badawczo-laboratoryjne. Pierwsze z nich to analogowy obiekt klasy mechatronicznej, w którym znajduje się system sterowania pracą silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1. Drugie stanowisko to urządzenie klasy elektrotechnicznej, którym jest elektrownia słoneczna małej mocy. Obydwa stanowiska były dogodnymi urządzeniami w zakresie dokonywania pomiarów, co pozwoliło na zastosowanie jednakowej metody pozyskiwania dla nich bazy wiedzy diagnostycznej. Uzyskana informacja z baz wiedzy była podstawą do realizacji badania stanów.
2. Opracowano komputerowy system diagnostyczny składający się z podsystemu akwizycji danych RIGOL M300 i autorskiej aplikacji komputerowej DIAG 2, realizującej pełen proces diagnostyczny z modułem analizy sygnałów pomiarowych IDS w CVS.
3. Dla obydwu obiektów technicznych z utworzonych stanowisk badawczo-laboratoryjnych przyjęto w procesie diagnozowania taki sam sposób realizacji metody dekompozycji ich struktur wewnętrznych. Zbudowany model funkcjonalno-diagnostyczny badanych obiektów oparto na czterech poziomach podziału struktury obsługowej. Pozwoliło to na wyodrębnienie zbioru sygnałów pomiarowych przypisanych do poszczególnych elementów struktury obiektu tworzących bazę wiedzy diagnostycznej.
4. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych i opracowanych reguł klasyfikacji stanów wyznaczono w procesie wnioskowania diagnostycznego tabelę stanów elementów podstawowych oraz zespołów funkcjonalnych obiektu dla badanej k-wartościowej oceny stanów, gdzie $k = \{2, 3, 4\}$.

5. Wprowadzenie czwartego stanu w diagnostyce 4VL określanego jako stan zdatności krytycznej „1” pozwoliło na wyodrębnienie uszkodzeń parametrycznych i krytycznych w stanach pośrednich dla badanych obiektów.
6. Przeprowadzone badania systemu sterowania silnikiem benzynowym typu Motronic ML 4.1 wykazały, że z 7 elementów będących w stanie niepełnej zdatności dla diagnozy trójwartościowej, aż 2 (przepływomierz powietrza $e_{3,1}$ i katalizator $e_{5,2}$) były w stanie krytycznej zdatności w przypadku diagnozy czterowartościowej. Analogicznie dla zespołów funkcjonalnych obiektu, aż 2 z 4 (układ zasilania powietrza E_3 i wylotowy E_5) znalazły się w przedziale krytycznej zdatności. Tak więc dodatkowa informacja wprowadzona przez czwarty stan dotyczyła 28% elementów i 50% zespołów funkcjonalnych określonych niepełną zdatnością w ocenie trójwartościowej.
7. W badaniu diagnostycznym elektrowni słonecznej małej mocy wprowadzony stan krytyczny w diagnozie czterowartościowej wystąpił w 33% elementów i 66% zespołów funkcjonalnych, będących w stanie niepełnej zdatności dla diagnozy trójwartościowej. Oznacza to, że dla obydwu stanowisk uzyskana dodatkowa informacja dotyczy około jednej trzeciej elementów określonych stanem niepełnej zdatności w diagnozach trójwartościowych. W pozostałych elementach występują uszkodzenia parametryczne, których czas odnowy jest relatywnie krótszy niż uszkodzeń krytycznych i dotyczy około 60-70% elementów ze stanem niepełnej zdatności.
8. Obliczone współczynniki rodzaju niezdatności w czterowartościowej ocenie stanów wynoszące $A_4(t) = 0,69$ dla danych pomiarowych uzyskanych z systemu sterowania silnikiem benzynowym typu Motronic ML 4.1 i $A_4(t) = 0,57$ dla elektrowni słonecznej małej mocy, były zbliżone do wartości teoretycznej równej $A_{teor,4}(t) = 0,66$. W obydwu przypadkach wykazywały wzrost o 68% i 42% w stosunku do współczynników rodzaju niezdatności dla logiki trójwartościowej $A_3(t) = 0,41$,
9. Średni czas przeprowadzania obsługi profilaktycznego równy $E_{pot}(4) = 3,12$ dla stanowiska I i $E_{pot}(4) = 2,32$ dla stanowiska II wykazał wzrost o 84% i 39% w stosunku do logiki trójwartościowej $E_{pot}(3) \approx 1,67$,
10. Dla elektrowni słonecznej małej mocy uzyskane współczynniki niezdatności $A_4(t)$ jak i średni czas przeprowadzania obsługi profilaktycznego $E_{pot}(4)$ były nieznacznie mniejsze od wartości teoretycznych. Przyczyną takiej sytuacji był

symulowany stan niezdatności w układzie pomiaru natężenia prądu przetwornika DC/AC.

Weryfikacja praktyczna rozważań teoretycznych zawartych w pracy, daje podstawę do stwierdzenia, że celowe jest zastosowanie proponowanej metody diagnozowania złożonych obiektów technicznych opartej na czterowartościowej ocenie stanu. Dotyczy ona wprowadzenia dodatkowego stanu zdatności krytycznej „1” w przedziale zmian istotnych cech eksploatacyjnych obiektu. Istota tej diagnozy zwiększa ilości uzyskanej informacji diagnostycznej w stosunku do dwu i trój-wartościowej oceny stanów obiektu technicznego. Wyznaczone diagnozy z badania dwóch różnych klas obiektów technicznych wskazują że: wprowadzenie dodatkowego stanu krytycznej zdatności pozwala zmniejszyć liczbę wystąpień stanu niezdatności (wielkość uszkodzeń). Taka strategia diagnozowania obiektów prowadzi do wydłużenia przeciętnego czasu bezawaryjnej pracy obiektu w przypadku użycia profilaktycznych obsługiwania technicznych.

Wykorzystanie w badaniach diagnostycznych komputerowego systemu DIAG 2 do przetwarzania sygnałów i realizacji procesu klasyfikacji stanów obiektu, nie powoduje znacznego zwiększenia nakładu kosztów związanych z wprowadzeniem czwartego stanu. Oznacza to, że wzrost czasu wymaganego do wykonania zadania diagnostycznego oraz kosztu użycia zasobów sprzętowych dla większej liczby stanów jest relatywnie niewielki. Dodatkową zaletą w zastosowaniu programu DIAG 2 jest możliwość jego rozbudowy w przyszłości poprzez modyfikację lub implementację nowych algorytmów i wprowadzenie dodatkowych stanów oceny obiektu. Duża uniwersalność i adaptacja dla różnych klas obiektów daje odczuwalne korzyści związane z realizacją komputerowego systemu diagnostycznego w badaniu złożonych obiektów technicznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych dwóch obiektów technicznych różnych klas oraz opracowanych wniosków możemy stwierdzić, że postawione hipotezy niniejszej rozprawy zostały jednoznacznie potwierdzone. Uzyskane wyniki badań mają duże znaczenie w ocenie własności użytkowych obiektów technicznych, zwiększając ich czas efektywnej eksploatacji. Wprowadzenie czwartego stanu na etapie diagnozowania może przyczynić się do podwyższenia poziomu sprawności procesu odnowy oraz zminimalizowania skutków niekorzystnych oddziaływań na obiekt.

7.3 Dalsze kierunki badań

W niniejszej rozprawie podjęto interesujący ale bardzo obszerny problem naukowy wymagający przeprowadzenia szczegółowych badań i analiz dla różnych klas obiektów technicznych. Uwzględniając przyjęte w pracy liczne uproszczenia oraz doświadczenie uzyskane w praktycznym zastosowaniu opisywanej metody [45, 55., 63, 71], dalsze badania powinny skupić się na trzech zagadnieniach, a mianowicie:

1. Opracowanie metod umożliwiających dokładniejsze rozpoznawanie uszkodzeń parametrycznych od krytycznych w czterowartościowej ocenie stanów.

Zagadnienie dotyczy głównie analizy uszkodzeń parametrycznych oraz krytycznych obiektów technicznych w celu określenia granic zmian stanów w przedziale zmian istotnych. Wykorzystanie w tym celu logiki rozmytej do określenia nieostrych granic zmian cech eksploatacyjnych obiektu może pozwolić na udoskonalenie modelu rozpoznawania stanów niepełnej zdatności i stanu zdatności krytycznej. Takie podejście może pozwolić na rozszerzenie modelu wyznaczaniu intensywność napraw w procesie odnowy oraz wydłużyć czas użytkowania obiektu technicznego.

2. Wprowadzenie dodatkowych stanów w logikach wielowartościowych dla $k > 4$.

Pomimo, że takie postępowanie wydaje się logiczne to wymaga przeprowadzenia wielu analiz dotyczących ilości uzyskania dodatkowej informacji w stosunku do kosztów poniesionych przy wdrożeniu kolejnych stanów. Konieczny do realizacji zadania aparat teoretyczny może być rozwinięciem zasad przedstawionych w niniejszej pracy. Wymaga on jednak zdefiniowania nowych stanów, kierunków i przedziałów ich zmian. Dodatkowo konieczne jest uzupełnienie modelu zmian cech eksploatacyjnych obiektu o dodatkowe stany i rozpatrzenie zysku informacyjnego, który maleje wraz ze wzrostem liczby stanów.

3. Opracowanie rozszerzonej struktury wewnętrznej obiektu dla poziomu elementów podstawowych z uwzględnieniem możliwości badania dowolnej liczby cech eksploatacyjnych.

Wprowadzone w pracy uproszczenie modelu elementu do badania jednego sygnału najbardziej znaczącej cechy eksploatacyjnej nie jest w praktyce wystarczającym rozwiązaniem. Ciągły wzrost złożoności obiektów i pobieranej informacji diagnostycznej w postaci sygnałów 1D, 2D (obrazy) i 3D (sceny) wymaga

rozpatrzenia w badaniu większej liczby sygnałów w poszczególnym elemencie obiektu. Jeżeli uwzględnimy, że większość sygnałów charakteryzuje się więcej niż jednym parametrem, to do opisu powyższych założeń będziemy potrzebowali dodatkowej tabelarycznej struktury przypisanej do każdego z elementów. Powstają w ten sposób dodatkowe wektory zawierające zbiory sygnałów dla poszczególnych elementów

i wektory parametrów przypisanych do poszczególnych sygnałów. Przedstawione podejście wymaga modyfikacji algorytmów klasyfikacji w procesie wnioskowania.

4. Implementacja, badanie i porównanie współczesnych algorytmów wnioskowania w komputerowym systemie diagnostycznym.

Nieustanna ewolucja algorytmów dotyczących zagadnienia klasyfikacji obiektów oraz zastosowanie systemów komputerowych umożliwia wdrażanie i testowanie zaawansowanych technik związanych z takimi dziedzinami jak sztuczne sieci neuronowe, logika rozmyta, zaawansowane techniki statystyczne, algorytmy hybrydowe oraz przetwarzanie równoległe i rozproszone. Konieczne może być również opracowanie nowych struktur przechowywania danych przy tworzeniu pomiarowej i diagnostycznej bazy wiedzy.

Powyżej opisane zagadnienia dalszego rozwoju tematyki poruszanej w niniejszej pracy nie wyczerpują całości problematyki związanej z diagnostyką złożonych obiektów technicznych. Wydaje się również konieczne dalsze prowadzenie analiz i badań związanych z zastosowaniem wielowartościowej oceny stanu obiektów technicznych różnych klas w procesie diagnozowania.

Bibliografia

1. Bernatowicz D., Duer S., Czterowartościowa logika stanów w diagnostyce złożonych obiektów technicznych, *Logistyka*, Tom 3, 2014, s.482-489.
2. Bernatowicz D., Duer S., Duer R. Zastosowanie logiki czterowartościowej w procesie diagnozowania silnika samochodowego, *Logistyka*, Tom 3, 2015, s.321-328.
3. Bernatowicz D., Duer S., Duer R., Zastosowanie programu diagnostycznego DIAG 2 wnioskującego w logice wielowartościowej w diagnostyce obiektów technicznych, *Logistyka*, Tom 3, 2015, s. 329-336.
4. Bernatowicz D., Duer S., Wrzesień P.: Expert system supporting the diagnosis of the wind farm equipments,. *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 928, Springer, 2018, pp. 432-441.
5. Będkowski L.: Elementy ogólnej teorii diagnostyki technicznej. WAT. Warszawa 1981.
6. Będkowski L.: Elementy diagnostyki technicznej. WAT. Warszawa 1991.
7. Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji cz. 1. WAT. Warszawa 2004.
8. Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji cz. 2. WAT. Warszawa 2006.
9. Będkowski L., Młokosiewicz J., Rozwadowski T.: Stan i kierunki rozwoju diagnostyki. Materiały konferencji DIAG - 86. Kielce 1986.
10. Białko M.: Metody i zastosowania sztucznej inteligencji. Politechnika Koszalińska. Koszalin 1996.
11. Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności. WNT. Warszawa 1985.
12. Borgoń J., Jaźwiński J., Sikorski H.: Niezawodność statków powietrznych. ITWL. Warszawa 1992.
13. Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych. PWN. Warszawa 1990.
14. Cempel Cz.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT. Warszawa 1982.
15. Cempel Cz., Tomaszewski F.: Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. Wyd. Międzyresortowe Centrum Nauki Eksploatacji Majątku Trwałego. Radom 1992.
16. Cholewa W.: Metoda diagnozowania maszyn z zastosowaniem zbiorów rozmytych. ZN Politechnika Śląska, seria Mechanika, Zeszyt nr 79, Gliwice 1983.

17. Cholewa W., Pedrycz K.: Systemy doradcze. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
18. Chromiec J., Strzemieczna E.: Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1995
19. Cygan Z.: Efektywność eksploatacji systemów technicznych. PWN. Warszawa 1990.
20. Cygan Z.: Modelowanie i symulacja systemów eksploatacji maszyn. PWN. Warszawa 1987.
21. Dhillon B.S.: Applied Reliability and Quality, Fundamentals, Methods and Procedures. Springer – Verlag London Limited, p. 186, 2006.
22. Duch W., Grudziński K.: Weighting and selection of features in Similarity Based Methods, Intelligent Information Systems VIII, Ustroń, Poland, 1999, pp. 32-36
23. Duer R., Duer S., Badanie diagnostyki urządzeń elektrowni słonecznej w logice 2- i 3-wartościowej, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, vol. 66, 2, 2017, pp. 67-79.
24. Duer R., Duer S., Informacja diagnostyczna z obiektu technicznego wykorzystana do tworzenia ekspertowej bazy wiedzy, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, vol. 66(2), 2017, s. 91-106.
25. Duer S., Laboratorium Elektrotechniki samochodowej Tom I. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2009, str. 199,
26. Duer S., Applications of an artificial intelligence for servicing of a technical object, Neural Computing & Applications, vol. 22, no. 5, 2013, pp. 955-968.
27. Duer S., Artificial neural network in the control process of object's states basis for organization of a servicing system of technical objects, Neural Computing & Applications, vol. 21, no. 1, 2012, pp. 153-160.
28. Duer S. Assessment of the quality of decisions worked out by an artificial neural network which diagnoses a technical object. Neural Computing & Applications. Vol. 21, No 5, 2012, pp. 1049-1063.
29. Duer S.: Computer diagnostic system with expert knowledge for state's control of technical objects, w monografi: System Modelling Control – 2005. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. s. 352-358. Warszawa 2005.
30. Duer S.: Determination of an expert knowledge base for servicing of a repairable technical object. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, Vol. 44, No. 2 (158), pp. 59-72. Warszawa 2009.

31. Duer S., Diagnostic system for the diagnosis of a reparable technical object, with the use of an artificial neural network of RBF type, *Neural Computing & Applications*, Vol. 19(5), 2010, pp. 691-700.
32. Duer S., Diagnostic system with an artificial neural network in diagnostics of an analogue technical object, *Neural Computing & Applications*, Vol. 19(1), 2010, pp. 55-60.
33. Duer S., Examination of the reliability of a technical object after its regeneration in a maintenance system with an artificial neural network, *Neural Computing & Applications*, vol. 21(3), 2012, pp. 523-534..
34. Duer S.: Expert knowledge base to support maintenance of a radar system. *Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 5, pp. 531-540. 2010.
35. Duer S.: Inteligentny system wspomagający proces odnawiania cech eksploatacyjnych w złożonych obiektach technicznych, *Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej*, s. 238. Koszalin 2012.
36. Duer S., Modeling of the operation process of repairable technical objects with the use information from an artificial neural network, *Expert Systems With Applications*, vol. 38, 2011, pp. 5867-5878
37. Duer S.: System ekspertowy, ze sztuczną siecią neuronową obsługujący zestaw stacji radiolokacyjnej, [w:] monografii pod redakcją Adama Grzecha, „Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe”. *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*. s. 377-388. Warszawa 2009.
38. Duer S., Wnioskowanie diagnostyczne o stanie obiektu technicznego w logice kwantyfikacji, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. 66, nr 1, 2017, s. 115-126,
39. Duer S.: Wytwarzanie energii elektrycznej. *Wyd. Politechniki Koszalińskiej*, Koszalin 2015, s. 168.
40. Duer S., Bernatowicz D., The computer diagnostic program (DIAG 2) for identifying states of complex technical objects, *EEMS 2017, E3S Web of Conferences*, vol. 19, 2017, pp. 241-247.
41. Duer S., Bernatowicz D., Duer R., Metoda wnioskowania w logice wielowartościowej w programie diagnostycznym DIAG 2, *Logistyka*, Tom 3, 2015, s. 1100-1107.

42. Duer S., Bernatowicz D., Duer R.: Wykorzystanie logiki czterowartościowej w komputerowym programie diagnostycznym DIAG 2, *Logistyka*, Tom 3, 2015, s. 1108-1115.
43. Duer S., Bernatowicz D., Wrzesień P., Duer R., Examination of informativeness of diagnoses expressed with multiple-valued logic, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. 67, 2, 2018, pp. 169-178
44. Duer S., Bernatowicz D., Wrzesień P., Duer R., Diagnosing of a complex technical object in four-valued logic, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. 67, 1, 2018, pp. 33-42,
45. Duer S., Bernatowicz D., Wrzesień P., Duer R., The diagnostic system with an artificial neural network for identifying states in multi-valued logic of a device wind power, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 928, Springer, 2018, pp. 442-454.
46. Duer S., Duer P.: Jakościowa ocena systemu diagnozowania obiektu technicznego, XI Konferencja ZKwE-2006, Politechnika Poznańska, Poznań, 2006, s. 163-164.
47. Duer, S., Duer, R.: Diagnostic system with an artificial neural network which determines a diagnostic information for the servicing of a reparable technical object. *Neural Computing & Applications*, vol. 19(5), 2010, pp. 755-766.
48. Duer S., Duer R., Mazuru S., Determination of the expert knowledge base on the basis of a functional and diagnostic analysis of a technical object, *Nonconventional Technologies Review*, Romanian, June, 2016, pp. 23-29.
49. Duer S., Lukac O., Pokoradi L., Bernatowicz D.: Logiki k-wartościowe stosowane w systemach diagnostycznych, nadzoru i bezpieczeństwa. XXXI Konferencja Międzynarodowa „Ekopolitaris 2017” Wojskowa Akademia Techniczna, 12-15.09.2016, Zakopane, str. 1-6,
50. Duer S., Pokoradi L., Bernatowicz D., Duer R., Classification of elements in the diagnostic model of a technical object for building an expert knowledge base. *Journal of Mechanical and Engineering*. Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 71-78.
51. Duer S., Scaticailov S., Paś J., Duer R., Bernatowicz D., Taking decisions in the diagnostic intelligent systems on the basis information from an artificial neural network, *MATEC Web of Conf.*, Vol. 178, 07003, 2018.
52. Duer S., Valicek J., Paś J., Stawowy M., Bernatowicz D., Duer R., Walczak M.: Neural Networks in the Diagnostics Process of Low-Power Solar Plant Devices *Energies* 2021, 14(9), 2719,

53. Duer S., Wrzesień P., Duer R.: Creating of structure of facts for the knowledge base of an expert system for wind power plant's equipment diagnosis. International Conference Energy, Environment and Material Systems, EEMS 2017;, E3S Web of Conferences 19, 01029 (2017).
54. Duer S., Wrzesień P., Bernatowicz D., Drawski L.: Zastosowanie drzewa decyzyjnego w torze sprawdzeń diagnostycznych, Technika Transportu Szynowego, No.12, 2017, s. 1-4.
55. Duer S., Wrzesień P., Duer R.: Projekt systemu ekspertowego wspomagającego użytkowanie elektrowni wiatrowej. LOGISTYKA 3/2015, s. 1116-1124.
56. Duer S., Wrzesień P., Duer R., Bernatowicz D., Diagnostics of low-capacity solar power station equipment with 2- and 3-valued logic, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, vol. 67, 3, 2018, pp. 33-42.
57. Duer S., Zajkowski K., Laboratorium Elektrotechniki samochodowej Tom II. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2010.
58. Duer S., Zajkowski K., Diagnozowanie silnika samochodowego z wykorzystaniem programu komputerowego DIAG, Logistyka No 3, 2014, p. 1466-1473.
59. Duer S., Zajkowski K., Taking decisions in the expert intelligent system to support maintenance of a technical object on the basis information from an artificial neural network, Neural Computing & Applications, vol. 23(7), 2013, pp. 2185-2197
60. Duer S., Zajkowski K., Duer R., Zastosowanie logiki 4-wartościowej w procesie wnioskowania w systemach diagnostycznych, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, vol. 65, 2, 2016, pp. 41-52.
61. Duer S., Zajkowski K., Duer R., Paś J.: Designing of an effective structure of system for the maintenance of a technical object with the using information from an artificial neural network. Neural Computing & Applications, vol. 23(3{4}), 2013, pp. 913-925.
62. Duer S., Zajkowski K., Duer R., Wrzesień P.: Bernatowicz D., Ekspertowa baza wiedzy wspomagająca diagnozowanie urządzeń farmy wiatrowej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2017, p. 163.
63. Duer S., Zajkowski K., Harničárová M., Charun H., Bernatowicz D.: Examination of Multivalent Diagnoses Developed by a Diagnostic Program with an Artificial Neural Network for Devices in the Electric Hybrid Power Supply System "House on Water", Energies 2021, 14(8), 2153,

64. Duer S., Zajkowski K., Paś J.: Baza wiedzy wspomagająca obsługiwane urządzeń sterowania pracą silnika pojazdu samochodowego. s. 76, LOGISTYKA 2/2010.
65. Duer S., Zajkowski K., Duer R., Bernatowicz D., Wrzesień P.: Inteligentny system nadzoru i bezpieczeństwa dla farmy wiatrowej. s. 3312-3321, LOGISTYKA 6/2014,
66. Duer S., Zajkowski K., Paś J.: Baza wiedzy wspomagająca obsługiwane urządzeń sterowania pracą silnika pojazdu samochodowego, Logistyka nr 2, 2010 , s. 76-84.
67. Duer S., Zajkowski K., Palkova Z., Lukac O.: System diagnostyczny monitorujący stan bezpieczeństwa użytkownika elektrowni wiatrowej. EKOMILITARIS 2015, WAT, Zakopane 15-18 września 2015r. WAT, s. 1-9, Warszawa 2015.
68. Duer S., Zajkowski K., Palkova Z., Lukac O., Pokoradi L., Duer R., Bernatowicz D., Wnioskowanie w logice 4-wartościowej w inteligentnych systemach diagnostycznych i bezpieczeństwa, Inżynieria Bezpieczeństwa-Ochrona Przed Skutkami Nadzwyczajnych Zagrożeń, Rozdział 6, 2016 s. 17-18.
69. Duer S., Zajkowski K., Płocha I., Duer R., Training of an artificial neural network in the diagnostic system of a technical object, Neural Computing & Applications, vol. 22, no. 7, 2013, pp. 1581-1590.
70. Duer S., Zajkowski K., Sokołowski S., Płocha.: Structure of the expert system for servicing of a complex technical object. Informačné a automatizačné technológie v riadení procesov, 12. – 14. september 2011, VERNÁR – SLOVENSKÝ RAJ.
71. Duer S., Zajkowski K., Wrzesień P., Duer R.: Diagnostyka użytkowania urządzeń elektrowni wiatrowej. LOGISTYKA 3/2015, s. 1140-1148.
72. Dwiliński L.: Wstęp do teorii eksploatacji obiektu technicznego. Wyd. Politechnika Warszawska. Warszawa 1991.
73. Dyduch J. Moczarski J.: Podstawy eksploatacji systemów sterowania ruchem kolejowym, Seria Monografie, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2008.
74. Dyduch J., Paś J.: Analiza procesu eksploatacji w transportowych systemach nadzoru, Logistyka nr 6, 2008
75. Dyduch J., Rosiński A.: Proces eksploatacji systemów nadzoru. Prace Naukowe PR Transport nr 17. Radom 2003.
76. Dyduch J., Rosiński A.: „Wybrane aspekty eksploatacji i niezawodności systemów bezpieczeństwa”, Prace Naukowe Politechniki Radomskiej Transport Nr 1(15) Radom 2002.

77. Fidells E., Firkowicz S., Grzesiak K., Kołodziejcki J., Wiśniewski K.: Matematyczne podstawy oceny niezawodności. PWN. Warszawa 1966.
78. Flasiński M.: Wstęp do teorii sztucznej inteligencji. PWN. Warszawa 2011.
79. Gajek A., Juda Z.: Czujniki. WKŁ, Warszawa, 2008,
80. Gercbach I.B., Kordonski Ch.B.: Modele niezawodnościowe obiektów technicznych. WNT. Warszawa 1968.
81. Guntenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów. PWN. Warszawa 1987.
82. Gupta M., Jin L., Homma N., Static and Dynamic Neural Networks, From Fundamentals to Advanced Theory. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
83. Hamrola A.: Zarządzanie jakością z przykładami. PWN. Warszawa 2005.
84. Hebda M., Niziński S., Pelc H.: Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych. WKiŁ. Warszawa 1984.
85. Hojjat A., Shih – Lin hung.: Machine learning, neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. John Wiley and Sons, Inc 1995.
86. Horstmann C. S.: Java. Podstawy, Wydanie X, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2016
87. Jackson P.: Intoduction to Exspert Systems. Addison – Wesley Publishing Company 1990, p. 526.
88. Jaźwiński J., Borgoń J.: Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów. WKiŁ. Warszawa 1990.
89. Jadźwiński J., Klimaszewski S.: Modele zużycia elementów statków powietrznych w aspekcie wyznaczania zapasu części wymiennych. Systemy Logistyczne Wojsk, Nr 31, 2006.
90. Jendrock E., Cervera-Navarro R., Evans I., Haase K., William M., Java Platform Enterprise Edition. The Java EE Tutorial, Release 7, Oracle, 2014
91. Kacalak W., Lipiński D., Tomkowski R.: Podstawy jakościowej oceny stanu powierzchni kształtowanych z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych. Pomiar Automatyka Kontrola, nr 4 (2008). PAK-SIMP 2008. 180-183.
92. Kacalak W., Majewski M., New Intelligent Interactive Automated Systems for Design of Machine Elements and Assemblies. In: Lecture Notes in Computer Science. LNCS, Springer, vol. 7666, 2012, pp. 115-122.
93. Kacalak W., Majewski M.: Inteligentny system obustronnej głosowej komunikacji systemu pomiarowego z operatorem dla technologii mobilnych. Pomiar Automatyka Kontrola, Vol. 55, nr 4 (2009). Wydawnictwo PAK 2009. 221-224.

94. Karpiński J., Firkowicz S.: Zasady profilaktyki obiektów technicznych. PWN. Warszawa 1981.
95. Karpiński J., Korczak E.: Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych. IBS PAN. Warszawa 1990.
96. Knosala R.: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. WNT. Warszawa 2002.
97. Klausmeier R.: Using artificial intelligence in vehicle diagnostic systems. „SAE Techn. Pap. Ser.” 1986. No 961124, p. 1-7.
98. Kobayashi S., Nakamura K., Knowledge compilation and refinement for fault diagnosis. IEEE Expert, vol. 6(5), 1991, pp. 39-46
99. Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN. Warszawa 1973.
100. Konieczny J.: Inżynieria systemów działania. WNT. Warszawa 1983.
101. Korbicz J., Patan K.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w symulacji i sterowaniu procesami metalurgicznymi - NEUROMET '98. materiały 2. seminarium. Wyd. Akapit. s. 26-48. Kraków 1998.
102. Korbicz J.: Diagnostyka procesów. WNT. Warszawa 2002.
103. Kosiński R.: Sztuczne sieci neuronowe, dynamika i chaos. WNT. Warszawa 2004.
104. Kościelny J.M.: Algorytmy i oprogramowanie do nadzoru obwodów regulacji. Pomiary Automatyka i Robotyka, T. 11 (2010), s. 69-73.
105. Kościelny J.M., Syfert M., Wnuk P.: Artificial intelligence methods In advanced monitoring and diagnostic system AMandD. Conference AI-METH 2005, Rent developments in artificial intelligence methods, 2005, pp. 111-114.
106. Koźniewska I., Włodarczyk M.: Model odnowy, niezawodności i masowej obsługi. PWN. Warszawa 1978.
107. Le T.T, Watton, J., Pham. D.T.: An Artificial Neural Network Based Approach to Fault Diagnosis and Classification of Fluid Power Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part I, Vol. 211 Issue 4, p. 307. 1997.
108. Lewitowicz J.: Problemy współczesnej teorii eksploatacji. Problemy eksploatacji, 4 (59), 2005.
109. Lewitowicz J., Lorch L., Manerowski J.: Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej. Tom 6. ITWL. Warszawa 2006, s. 450.
110. Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych – systemy eksploatacji statków powietrznych. Tom 3. ITWL, Warszawa 2006, s. 495.

111. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy. Wyd. ASKON, Warszawa 2002.
112. Łachwa A.: Rozmyty świat zbiorów, liczb, faktów, reguł i decyzji. EXIT. Warszawa 2001.
113. Łęski J.: Systemy neuronowo-rozmyte, WNT, Warszawa, 2008,
114. Łukaszewicz J.: O logice trójwartościowej, Ruch filozoficzny, 1920, No.5.
115. Łukaszewicz J.: Sylogistyka Arystotelesa z punktu widzenia współczesnej logiki formalnej, PWN, Warszawa, 1988.
116. Majewski M.: Podstawy budowy inteligentnych systemów interakcji urządzeń technologicznych i ich operatorów. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2010, s. 290.
117. Małek A., Mazur T.: Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych. WNT. Warszawa 1979.
118. Młokosiewicz J.R.: Metoda wielopoziomowego badania stanu obiektów technicznych i synteza systemu diagnostycznego. WAT. Warszawa 1987.
119. Młokosiewicz J.R., Więcek A.: The mikroprocessor system for threestated diagnostics of complex technical objects. RELCOMEX'89, p. 225-232. Ossolineum. Poland 1989.
120. Mori M., Fujishima M., Komatsu M., Zhao B., Liu Y.: Development of remote monitoring and maintenance system for machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 57, Nr 1 (2008). Elsevier Oxford 2008, 433-43.
121. Moczulski W.: Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
122. Nakagawa T.: Maintenance Theory of Reliability. Springer – Verlag London Limited, p. 264, 2005
123. Nakagawa T., Ito K.: Optimal inspection policies for a storage system with degradation at periodic tests. Math. Comput. Model. Vol. 31, pp. 191-195, 2000.
124. Nałęcz M.: Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, tom 6, Sieci neuronowe. EXIT. Warszawa 2000.
125. Niedrliński A.: Regułowe systemy ekspertowe. Wyd. Pracowni Komputerowej J. Kalmarskiego, Gliwice 2005.
126. Niziński S., Pelc H.: Diagnostyka urządzeń mechanicznych. WNT. Warszawa 1980.

127. Niziński S. Żółtowski B.: Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. Bydgoszcz - Sulejówek 2002.
128. Niziński S., Kupicz W., Mikołajczak P., Rychlik A., Szczygła P., Wierzbicki S.: Systemy diagnostyczne wojskowych pojazdów mechanicznych. Sulejówek – Radom 2011.
129. Nowicki R.: Systemy Bently Nevada Corp. Przeznaczone dla nadzoru stanu technicznego maszyn. PAK 1999 nr 04, s. 32-34.
130. Pedrycz W.: Fuzzy Control and fuzzy systems. John Wiley & Sons, Inc 1993.
131. Pietrasieński J.: Porównanie układów obsługi obiektu. Biuletyn WAT. nr 11 (387). Warszawa 1984.
132. Pietrasieński J.: Efektywność informacyjna procesów diagnozowania urządzeń elektronicznych (monografia habilitacyjna). WAT. Warszawa 1991.
133. Pietrasieński J.: Wpływ diagnozowania i odnawiania na jakość obiektu. Biuletyn WAT. nr 11 (471). Warszawa 1991.
134. PN - 93/N - 50191 - 191: Niezawodność i eksploatacja. Warszawa 1993.
135. Rasiowa H.: Wstęp do matematyki współczesnej. PWN. Warszawa 1971.
136. Rigol User Guides, M300 Series Data Acquisition/Switch System, RIGOL Technologies, Inc. 2015
137. Rosiński A., Design of the electronic protection systems with utilization of the method of analysis of reliability structures. In: Nineteenth International Conference On Systems Engineering (ICSEng). USA, 2008, pp. 402-407.
138. Rozwadowski T.: Diagnostyka techniczna obiektów złożonych. WAT. Warszawa 1983,
139. Shafranovich Y., Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files, RFC 4180, IETF, 2005, DOI: 10.17487/RFC4180,
140. Słowiński B.: Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych. Wyd. Wyższa Szkoła Inżynierska. Koszalin 1992.
141. Staniszewski R.: Sterowanie procesem eksploatacji. WNT. Warszawa 1990.
142. Syfert M., Wnuk P., Kościelny J.M.: System zaawansowanego monitorowania i diagnostyki AMandD. Pomiar Automatyka Kontrola, (2005), s. 157-159.
143. Szabatin J., Podstawy teorii sygnałów, Wydanie 3, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000,
144. Tomaszek H., Wróblewski M.: Podstawy oceny efektywności eksploatacji systemów uzbrojenia lotniczego. WAT wew. 2659/2000, Warszawa 2000.

145. Tomaszek H., Żurek J., Jaształ M.: Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych. Wyd. ITE. Radom 2008.
146. Tutak M., Automatyczny system pomiarowy systemu ekspertowego obiektu technicznego na przykładzie elektronicznego sterowania pracą silnika o zapłonie iskrowym, Praca magisterska PK, Koszalin, 2006,
147. Vohra A., Vohra D.: Pro XML Development with Java Technology, Apress, 2006.
148. Więcek A.: Diagnostowanie złożonych obiektów technicznych przy trójwartościowej klasyfikacji stanów, WAT, Warszawa, 1990
149. Zawadzki J.: Niezawodność i eksploatacja. WAT. Warszawa 1978.
150. Żółtowski B., Jankowski M., Ćwik Z.: Diagnostyka techniczna pojazdów. Wydawnictwo ATR. Bydgoszcz 1994.
151. Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej. Wyd. Uczelniane ATR. Bydgoszcz 1996.
152. Żółtowski B., Cempel C. (red.): Inżynieria Diagnostyki Maszyn, praca zbiorowa. PTDT ITE PIB Radom. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
153. Żółtowski B., Tylicki H.: Elementy diagnostyki technicznej maszyn. Wyd. PWSZ w Pile. Piła 2008

Spis rysunków

Rys. 2.1. Schemat diagnozowania na podstawie przedziału zmiany mierzonej cechy sygnału diagnostycznego $\{X_{i,j}\}$ [49]	22
Rys. 2.2. Schemat wnioskowania statystycznego w logikach k-wartościowych [49]	24
Rys. 2.3. Przedziały zmian wartości cechy i-tego sygnału diagnostycznego [1].....	27
Rys. 2.4. Graf zmian stanów obiektu w logice czterowartościowej.....	28
Rys. 2.5. Schemat klasyfikacji stanów obiektu w logice dwu, trzy i czterowartościowej [1]	29
Rys. 2.6. Schemat zmiany stanów cech eksploatacyjnych obiektu w czasie użytkowania.....	31
Rys. 3.1. Model funkcjonalno-diagnostyczny obiektu technicznego.....	40
Rys. 3.2. Schemat sprawdzeń.....	44
Rys. 3.3. Schemat wnioskowania w procesie diagnostycznym w oparciu o czterowartościową ocenę stanu.....	47
Rys. 3.4 Schemat procesu wnioskowania w systemie diagnostycznym z czterowartościową oceną stanu.....	53
Rys. 4.1. Schemat strukturalny układu diagnostycznego z programem DIAG 2 [41]	57
Rys. 4.2. Schemat przetwarzania informacji w systemie diagnostycznym DIAG 2.....	59
Rys. 5.1. Schemat strukturalny systemu sterowania typu Motronic [58].....	77
Rys. 5.2. Stanowisko badawcze benzynowego silnika o zapłonie iskrowym z systemem sterowania Motronic 4.1	78
Rys. 5.3. Przykładowy sygnał przedstawiający napięcie na wyjściu alternatora w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2	80
Rys. 5.4. Przykładowy sygnał sterowania mechanizmem biegu jałowego w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2	80
Rys. 5.5. Przykładowy sygnał wyjściowy świecy zapłonowej w dziedzinie czasu (po lewej) i jego funkcja autokorelacji (po prawej) uzyskane w programie DIAG 2	80
Rys. 5.6. Schemat funkcjonalno-diagnostyczny elektronicznego systemu sterowania pracą benzynowego silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1 [57].....	82
Rys. 5.7. Panel programu DIAG 2 ze strukturą funkcjonalno-diagnostyczną systemu sterowania pracą silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic M.4.1 [3].....	83
Rys. 5.8. Fragment danych symulacji pracy silnika benzynowego o zapłonie iskrowym typu Motronic ML 4.1 edytowany w arkuszu kalkulacyjnym	86
Rys. 5.9. Tabele stanów uzyskane w procesie klasyfikacji systemu sterowania silnikiem samochodowym typu Motronic dla czterowartościowej oceny stanów [2]	88
Rys. 5.10. Porównanie wyników klasyfikacji dla logiki dwu, trzy i czterowartościowej układu sterowania silnikiem o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1 [2].....	90
Rys. 6.21. Schemat układu pomiarowego do badania elektrowni słonecznej małej mocy [56] .	96

Rys. 6.2. Schemat funkcjonalno-diagnostyczny urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy	98
Rys. 6.3. Panel programu DIAG 2 ze strukturą funkcjonalno-diagnostyczną urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy	99

Spis tabel

Tabela 3.1. Zestawienie sygnałów diagnostycznych obiektu przedstawionego na rysunku 3.1 .	42
Tabela 3.2. Zestawienie wzorcowych sygnałów obiektu przedstawionego na rysunku 3.1	42
Tabela 3.3. Zestawienie stanów obiektu przedstawionego na rysunku 3.1	43
Tabela 3.4. Tablica sprawdzeń obiektu.....	46
Tabela 5.1. Lista zespołów funkcjonalnych i zbior elementów podstawowych badanego obiektu wyznaczonych w opracowaniu diagnostycznym	84
Tabela 5.2. Struktura wewnętrzna systemu sterowania pracą benzynowego silnika o zapłonie iskrowym typu Motronic M.4.1 [2].....	87
Tabela 5.3. Zestawienie sygnałów pomiarowych obiektu przedstawionego na rysunku 5.6 [2]	87
Tabela 5.4. Zestawienie sygnałów wzorcowych obiektu przedstawionego na rysunku 5.6.[2].	88
Tabela 5.5. Przyrost dodatkowej informacji diagnostycznej w logice trzy i cztero-wartościowej dla układu sterowania silnikiem o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1.....	91
Tabela 5.6. Efektywność profilaktycznego obsługiwanian technicznego w logice trzy i czterowartościowej dla układu sterowania silnikiem benzynowym o zapłonie iskrowym Motronic ML 4.1.....	92
Tabela 6.1. Lista zespołów funkcjonalnych i elementów podstawowych oraz przypisanych do nich sygnałów diagnostycznych [56].....	100
Tabela 6.2. Struktura wewnętrzna urządzenia elektrowni słonecznej małej mocy [56]	102
Tabela 6.3. Zestawienie sygnałów pomiarowych obiektu przedstawionego na rysunku 6.3....	102
Tabela 6.4. Tablica sygnałów wzorcowych obiektu przedstawionego na rysunku 6.3.....	102

Spis załączników (płyta CD)

- Załącznik nr 1: Środowisko uruchomieniowe Javy (JDK) w wersji JVM 8 (Windows)
- Załącznik nr 2 : Komputerowy program diagnostyczny DIAG 2 (wersja demonstracyjna)

Płyta CD z załącznikami