

Rozdział 2

Wprowadzenie do diagnostyki

Celem rozdziału jest ukazanie problemu diagnozowania procesów przemysłowych. Przedstawiono w nim krótki przegląd metod realizacji układów diagnostyki. Ponadto dokonano przeglądu podstawowych metod analitycznych stosowanych w diagnozowaniu procesów przemysłowych. Omówione zagadnienia stanowią wprowadzenie do tematyki, która będzie rozwijana w kolejnych rozdziałach monografii.

2.1. Wstęp

Proces diagnozowania obiektów przemysłowych obejmuje zagadnienia detekcji, lokalizacji i oceny poziomu uszkodzenia. Do realizacji powyższych zadań aktualnie stosuje się różne techniki oceny stanu obiektu. W przypadku prostych procesów często stosuje się metody oparte na modelu wejściowo-wyjściowym z progową oceną wybranych sygnałów obiektowych [188]. Dla złożonych procesów przemysłowych ww. metody są mało skuteczne i nieefektywne, co wynika z silnych interakcji występujących między poszczególnymi sygnałami, opisującymi stan podzespołów diagnozowanego procesu. W takich przypadkach poszukuje się innych technik, zapewniających dobrą jakość procesu diagnostycznego [20].

Podstawową techniką budowania systemów detekcji i izolacji uszkodzeń (ang. *Fault Detection and Isolation, FDI*) jest oparcie systemu na modelach diagnozowanego obiektu, modelach globalnych lub lokalnych [131]. Wyróżnia się kilka metod budowy modeli: analityczna - wymagająca znajomości fizyki zjawisk występujących w procesie, oparta na bazie wiedzy - najczęściej uzyskanej od eksperta oraz modeli wejściowo-wyjściowych budowanych na bazie danych uzyskanych eksperymentalnie. Zastosowanie modeli analitycznych wiąże się z uproszczeniami związanymi z budową modeli liniowych. W sytuacjach gdy zdefiniowanie modelu matematycznego jest trudne lub wręcz niemożliwe lub gdy złożoność uzyskanego modelu uniemożliwia jego praktyczne wykorzystanie, wówczas budowa systemu

diagnostycznego z modelem analitycznym jest trudna do realizacji lub uzyskane wyniki są niesatysfakcjonujące.

W tej sytuacji rozwiązania problemu można poszukiwać w zastosowaniu systemów ekspertowych (ang. *Expert Systems, ES*) ze zdefiniowaną w procesie akwizycji wiedzy, bazą wiedzy [153]. Dobrej skuteczności procesu diagnozowania można oczekiwać w systemach opartych na technikach hybrydowych wykorzystujących systemy ekspertowe wiążące modele neuronowe i systemy rozmyte [134, 184]. Istotnym zagadnieniem budowy systemu ekspertowego jest gromadzenie na odpowiednim poziomie wiedzy o diagnozowanym obiekcie. Monitorowanie procesu przemysłowego stanowi często źródło danych o zjawiskach zachodzących w procesie, które mogą być wykorzystane (po odpowiednim przetworzeniu) do akwizycji wiedzy niezbędnej do prawidłowego funkcjonowania systemu ekspertowego. Proces tworzenia baz danych analitycznych zaliczony został do grupy problemów przygotowania i wykorzystania hurtowni danych [203]. Postęp technologiczny sprawia, że stworzenie hurtowni danych, dostarczającej na czas wiarygodnej informacji do podejmowania decyzji, staje się możliwe. Proces przygotowania hurtowni danych w oparciu o dane operacyjne zawarte w różnego typu bazach danych procesowych można zrealizować przy użyciu technik sztucznej inteligencji [118]. Zaliczyć do nich można: sztuczne sieci neuronowe (ang. *Artificial Neural Network, ANN*), logikę rozmytą (ang. *Fuzzy Logic, FL*) [99, 176, 177] i algorytmy ewolucyjne (ang. *Evolutionary Algorithms, EA*) [211].

W procesie przetwarzania operacyjnych danych procesowych dobre rezultaty można osiągnąć, wykorzystując niesymboliczną reprezentację wiedzy. Przykładem mogą być sztuczne sieci neuronowe i zbiory rozmyte. Neuronowe klasyfikatory pozwalają wyekstrahować ważne z punktu widzenia funkcjonowania systemu ekspertowego cechy danych zawartych w bazach operacyjnych. Reprezentacja wiedzy w oparciu o logikę rozmytą pozwala wydobywać istotne cechy stanu monitorowanego procesu na bazie dużej liczby danych operacyjnych i zarchiwizowanych (ang. *data mining, DM*) [216].

Diagnostyka procesów przemysłowych może być realizowana z zastosowaniem różnych elementów bazy wiedzy. Zaliczyć do nich można wiedzę uzyskaną z wykorzystaniem metod analitycznych, sieci neuronowych lub logiki rozmytej. Każde z tych narzędzi diagnostycznych ma różne dedykowane zastosowania oraz związane z tym cechy. Detekcja uszkodzeń z zastosowaniem metod analitycznych jest niekiedy niemożliwa, ponieważ techniki te wymagają dobrej znajomości modelu procesu. Przy nieprecyzyjnym modelu bardzo prawdopodobne jest powstawanie fałszywych alarmów, wynikających z błędów estymacji zmiennych stanu lub parametrów procesu.

W pewnych przypadkach rozwiązanie tych problemów uzyskano stosując do budowy detektorów sztuczne sieci neuronowe. Detektory neuronowe znajdują za-

stosowanie, gdy informacja o procesie jest określona funkcjonalnie przez eksperymenty. Zasada wykorzystania uczonego na bazie danych eksperymentalnych detektora neuronowego rozumiana jest jako ogólnie dobra aproksymacja poszukiwanej charakterystyki diagnozowanego obiektu [47]. Ponadto przy odpowiedniej ilości danych uczących sieci neuronowe (wykorzystując własności uogólniania) umożliwiają interpolację odpowiedzi na wejście nieużywane w eksperymentach. Jedną z ważniejszych cech sieci neuronowych jest szybka realizacja procesu przetwarzania zasymilowanej w procesie uczenia wiedzy i udzielanie szybkiej odpowiedzi diagnostycznej. Projektując detektor neuronowy, rozwiązuje się zagadnienie wyboru typu i struktury sieci oraz wyznaczenia współczynników wag w procesie uczenia.

W złożonych procesach przemysłowych wiedza o stanie procesu bywa niedokładna i często uzupełniana wiedzą heurystyczną ekspertów. W tej sytuacji dobrą jakość modelowania podzespołów procesu jak również diagnozowania jego stanu można uzyskać budując systemy diagnostyczne przy użyciu zbiorów rozmytych [57, 183]. Rozmytą reprezentację wiedzy można zastosować w kilku blokach systemu diagnostycznego FDI. Zadanie optymalizacji struktury i parametrów rozmytego systemu diagnostycznego można zrealizować stosując techniki gradientowe w systemach neuro-rozmytych [190] lub metody poszukiwań bezpośrednich, w szczególności algorytmy ewolucyjne, aktualnie szeroko stosowane do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych [202, 210].

2.2. Techniki diagnostyki

Funkcjonujące procesy przemysłowe cechują się wzrostem złożoności technicznej i zwiększonymi wymaganiami w stosunku do systemów sterowania. Wymaga się wzrostu wydajności, obniżenia kosztów produkcji, elastyczności, odporności na zakłócenia i bezpieczeństwa nazywanego tolerancją na zakłócenia w systemie automatycznego sterowania. Tolerancję na uszkodzenia można uzyskać zarówno na drodze działań pasywnych lub aktywnych. Działania pasywne oparte są na odpornych technikach sterowania, w których system sterowania w pętli zamkniętej zapewnia niewrażliwość z uwzględnieniem uszkodzeń. Podejście aktywne dostraja układ do uszkodzenia poprzez rekonfigurację systemu sterowania w chwili pojawienia się uszkodzenia [175].

Sterowanie odporne może tolerować do pewnego stopnia małe uszkodzenia, natomiast koncepcja rekonfigurowania układu jest absolutnie nieuchronna, kiedy pojawia się poważne uszkodzenie, które może doprowadzić do awarii całego systemu. W przypadku zastosowania układu z dostrajaniem jednym z ważnych i pierwotnych zadań jest diagnostyka uszkodzeń. Poza tym diagnostyka jest niezbędna jako część zadań nadzorowania złożonych systemów sterowania procesami przemysłowymi. Diagnostyka uszkodzeń pojawia się jako ważne zadanie w nowoczesnej

teorii sterowania i szeroko zakrojone badania w tej dziedzinie obejmują okres ostatnich dwóch dekad. Wyniki uzyskane różnymi metodami w coraz większym stopniu znajdują zastosowanie w praktyce. Znane dzisiaj metody i techniki, pozwalające na zwiększenie niezawodności systemów produkcyjnych, umownie można podzielić na metody redundancji sprzętowej i analitycznej.

Metody redundancji sprzętowej wiążą się z powielaniem całych układów lub wybranych podzespołów, a zatem związane są ze zwiększeniem kosztów procesowych. Redundancja analityczna polega na formalnym zastosowaniu metod i technik teorii sterowania, przetwarzania sygnałów, modelowania ilościowego i jakościowego oraz sztucznej inteligencji. Metodologia projektowania układów diagnostycznych opiera się na modelach diagnozowanych procesów, przy czym mogą to być modele ilościowe, jakościowe lub ich kombinacje [68, 83, 84, 121, 123, 124]. Wybór odpowiedniej metody w dużej mierze jest uzależniony od złożoności diagnozowanego obiektu oraz od formy opisu zasad jego funkcjonowania. Metody oparte na modelach analitycznych mają ograniczoną stosowalność ze względu na trudności uzyskania dokładnych modeli, które najczęściej są nieliniowe. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie modeli jakościowych opartych głównie na technikach obliczeń inteligentnych [57, 107, 123]. Do tego typu technik można zaliczyć: systemy ekspertowe, sztuczne sieci neuronowe i logikę rozmytą [58].

Z metodologicznego punktu widzenia atrakcyjnym rozwiązaniem jest budowa układów diagnostycznych opartych na systemach ekspertowych. Systemy tego typu pozwalają tworzyć bazę wiedzy o diagnozowanym obiekcie, zarówno z wykorzystaniem wiedzy heurystycznej jak i analitycznej. Takie podejście umożliwia zintegrowanie wielu technik diagnostycznych, co zapewnia uzyskanie bardziej efektywnych układów diagnostycznych dla złożonych obiektów i procesów przemysłowych.

2.2.1. Metody realizacji układów diagnostyki

Podstawowy kierunek badań w zakresie diagnostyki procesów i systemów stanowią prace obejmujące metody wykrywania zdarzeń awaryjnych oraz metody określania relacji między symptomami zdarzeń awaryjnych a stanami obiektu diagnozowania. Znajomość tych relacji jest niezbędna do określania diagnozy na podstawie wyznaczonych objawów. Problematyka wyznaczania relacji jest rozważana od wielu lat a opracowane metody różnią się wymaganym stopniem wiedzy o obiekcie diagnozowania [88]. Złożone układy sterowania procesami technicznymi mają wbudowane funkcje kontrolujące, które sygnalizują niepożądane lub niedopuszczalne stany procesu i podejmują stosowną akcję w celu uniknięcia awarii. Wyróżnić można trzy rodzaje tego typu funkcji [128]:

- a. *monitorowanie* (ang. *monitoring*) - przeprowadzane w czasie rzeczywistym zadania polegające na pomiarze, odczytywaniu i przeliczaniu wartości zmiennych procesu oraz na porównywaniu tak otrzymanych wartości z wcześniej

przyjętymi ograniczeniami i ewentualne uruchamianie alarmów, tj. zadanie kontroli i sygnalizacji automatycznej. Zadania te obejmują również rejestrację danych,

- b. *nadzór* (ang. *supervision*) - monitorowanie obiektu i podejmowanie czynności dla utrzymania jego właściwego działania przy wystąpieniu defektów,
- c. *diagnostyka uszkodzeń* (ang. *fault diagnosis*) - rozpoznawanie badanego stanu procesu przez zaliczenie go do znanego stanu normalnego lub wcześniej zdefiniowanych stanów z uszkodzeniami.

Istotnym problemem w realizacji omawianych funkcji jest zdefiniowanie poziomu tolerancji między wielkością wykrytego odchylenia od stanu normalnego a fałszywym alarmem wywołanym zakłóceniami przemysłowymi. Często tego typu układy diagnostyczne są skuteczne w przypadku procesów, które pracują w stanie ustalonym.

Jednakże zadanie diagnostyki staje się bardziej złożone, jeśli punkt pracy procesu ulega zmianie. W tym przypadku pętla sprzężenia zwrotnego układu sterowania kompensuje zmiany w procesie za pomocą odpowiednich akcji korygujących sterowanie procesem. Wtedy wykrycie uszkodzenia na podstawie obserwacji sygnałów wyjściowych procesu jest niemożliwe tak długo, jak sygnały sterujące procesem nie wykrócą poza przedział dopuszczalny. Takie działanie systemu sterowania uniemożliwia wczesne wykrywanie uszkodzeń. W związku z tym metody te mogą być stosowane tylko w przypadku relatywnie dużych zmian cech procesu, wywołanych dużymi nagłymi lub ciągle, stopniowo narastającymi uszkodzeniami. Głównymi zaletami klasycznych metod opartych na analizie limitów jest ich prostota i niezawodność.

Obiekty złożone, w których uszkodzenia, o niewielkich nawet rozmiarach, mogą inicjować uszkodzenia kolejnych podzespołów, wymagają ciągłego nadzorowania z diagnostyką uszkodzeń. W procesie diagnozowania obiektu wyróżnia się dwa podejścia: opisujące stan obiektów w sposób funkcjonalny z pominięciem dynamiki oraz opisujące zachowanie obiektu z uwzględnieniem dynamiki. Analiza stanu obiektu statycznego dla celów diagnostyki bazuje na opisie zjawisk za pomocą równań funkcjonalnych, określających zależności między kierunkami zmian wielkości procesowych. Do najważniejszych metod detekcji uszkodzeń można zaliczyć:

- a. *analiza sygnatur* (proste sygnatury) [160]. Proste metody analizy sygnatur (odpowiedź obiektu na zadane wzorcowe wymuszenie wyznaczona w procesie projektowania) funkcjonują na zasadzie weryfikacji odpowiedzi w wybranych punktach obiektu na wzorcowe wymuszenia. Uzyskana informacja jest najczęściej skalarem. W przypadku kilku cech rozpatrywane są one niezależnie. Stosowane są one np. w elektrowniach jądrowych w systemie SUES [238];

- b. *rozszerzona analiza sygnatur* - metoda rozszerzonej analizy sygnatur wykorzystuje informację reprezentowaną w formie wektorowej i wzorce: zbiory cech używanych do podejmowania decyzji. Zastosowanie tej metody silnie jest uzależnione od własności dynamicznych obiektu, może się zdarzyć, że odpowiedź dynamiczna (spodziewana dla założeń operacyjnych) nie pozwala wydobyc koniecznych cech diagnostycznych;
- c. *metody oparte o sieć alarmów* (digraf instalacji) [121], które opisują rozprzestrzenianie się alarmów w instalacji. Identyfikacja stanów alarmowych odbywa się za pomocą tzw. alarmu dedykowanego. Każda diagnoza wymaga opracowania alarmu dedykowanego, zbudowanego w oparciu o funkcje logiczne określone na binarnych wartościach poszczególnych alarmów w procesie. Metoda ta ma dwie podstawowe wady: brak informacji o jednej ze zmiennych (np. uszkodzony czujnik), niezbędnej do określenia wartości logicznej alarmu dedykowanego, uniemożliwia dokonanie diagnozy określonego podzespołu, po drugie: metoda ta nie uwzględnia oddziaływania układów regulacji na kierunki zmian sygnałów w obiekcie. W metodzie tej w procesie diagnozowania uwzględnia się symptomy oparte na przekraczaniu wartości granicznych;
- d. *metoda zredukowanej tablicy decyzyjnej* [18]. Proces diagnozowania obiektu jest bardzo zbliżony do metody poprzedniej. Poszczególnym kombinacjom stanów zmiennych procesowych przyporządkowuje się określone diagnozy. Różnica między metodami dotyczy zasad analizy stanów awaryjnych na etapie projektowania. W tej metodzie każdej kombinacji symptomów przyporządkowywany jest stan awaryjny;
- e. *metoda grafu zdarzeń* [10, 121]. W tej metodzie buduje się graf zdarzeń podobny do drzewa alarmów, na bazie którego określa się związki między przyczynami i następstwami danego zdarzenia. Podstawową wadą metody jest brak możliwości modyfikacji procedur diagnostycznych przy zmianach struktury procesu technologicznego;
- f. *metoda oparta o model przyczynowy* [121, 212]. Do wykrywania zdarzeń awaryjnych buduje się logiczne związki między dwustanowymi wartościami sygnałów pomiarowych. Reguły diagnostyczne buduje się w oparciu o równania boolowskie. Zaletą metody jest możliwość wykrywania nie tylko pojedynczych uszkodzeń ale także uszkodzeń wielokrotnych. Niestety model logiczny często jest niewystarczający dla detekcji i lokalizacji uszkodzeń w przypadku złożonych ciągłych obiektów.
- f. *metody diagnozowania z zastosowaniem zbiorów rozmytych i przybliżonych*. Istotą metody jest opis wiedzy niedokładnej z zastosowaniem zbiorów rozmytych lub zbiorów przybliżonych. W przypadku stosowania logiki rozmytej wyznacza się wartość funkcji przynależności do zdefiniowanych klas stanu

obiektu. Stosowanie zbiorów przybliżonych wymaga zdefiniowania pary: dolnej i górnej aproksymacji. Dolna aproksymacja zawiera wszystkie symptomy, które z całą pewnością klasyfikowane są do określonej klasy stanu obiektu. Natomiast górna aproksymacja zawiera wszystkie symptomy, które mogą prawdopodobnie należeć do danej klasy stanu obiektu.

Druga grupa metod detekcji uszkodzeń obejmuje zadania diagnozowania obiektów z uwzględnieniem ich dynamiki. Koncepcja diagnozowania tego typów obiektów zawiera trzy podstawowe etapy [188]:

- a. obserwację, pomiary,
- b. detekcję, symptomy,
- c. diagnozę, lokalizację uszkodzenia.

Najczęściej znane metody pozyskiwania symptomów podzielono na dwie grupy: analityczne i heurystyczne. W grupie pierwszej następuje kojarzenie zbioru sygnałów pomiarowych M ze zbiorem symptomów S , czyli:

$$M \in R^k \Rightarrow S \in R^m, \quad (2.1)$$

gdzie M oznacza zbiór sygnałów pomiarowych, S - zbiór symptomów. W metodach heurystycznych następuje kojarzenie obserwacji z symptomami. W procesie lokalizacji uszkodzenia większość metod daje możliwość generacji binarnego wektora F skojarzonego z określonymi uszkodzeniami:

$$S \in R^m \Rightarrow F \in \{0, 1\}^n. \quad (2.2)$$

Na podstawie publikacji przedstawionych w ostatnich 10 latach na różnych konferencjach międzynarodowych i krajowych poświęconych diagnostyce procesów przemysłowych można wydzielić grupy różnych metod diagnostycznych stosowanych dla różnego typu uszkodzeń oraz diagnozowanych obiektów. Przedstawione poniżej wyniki obejmują grupy procesów prostych. Dla procesów złożonych nie znaleziono wystarczających danych, aby przygotować poniżej przedstawioną analizę. Najczęściej rozpatrywanym uszkodzeniem systemu przemysłowego było uszkodzenie procesu. Dla 165 analizowanych przykładów uzyskano następujące wyniki [90]:

- ◇ uszkodzenia czujników (69),
- ◇ uszkodzenia elementów wykonawczych (51),
- ◇ uszkodzenia procesu (83),
- ◇ uszkodzenia pętli sterowania lub regulatora (8).

System detekcji uszkodzeń może być realizowany za pomocą różnych metod. Dla 134 przykładów uzyskano następujący rozkład zastosowań metod detekcji:

- ◊ metody z obserwatorami stanów (53),
- ◊ metody z wykorzystaniem przestrzeni parzystości (14),
- ◊ metody z estymacją parametrów (51),
- ◊ metody z wykorzystaniem przekształcenia FFT (7),
- ◊ metody oparte o sztuczne sieci neuronowe (9).

Detekcja zmian w obiekcie oraz klasyfikacja uszkodzenia najczęściej była wykonywana za pomocą:

- ◊ sieci neuronowych **nn** (19),
- ◊ logiki rozmytej **fl** (5),
- ◊ klasyfikatorów Bayes'a **bc** (4),
- ◊ testowania hipotez **ht** (8).

W diagnostyce uszkodzeń stosowano różne strategie wnioskowania. Zainteresowanie różnymi strategiami kształtuje się następująco:

- ◊ bazy reguł **rb** (10),
- ◊ graf znakowanych kierunków **sdg** (3),
- ◊ drzewo symptom-uszkodzenie **fst** (2),
- ◊ logika rozmyta **fl** (6).

Wybór metody diagnostycznej jest ściśle związany z rodzajem diagnozowanego procesu [188]. Najbardziej przebadanymi, z punktu widzenia możliwości diagnozowania, są procesy mechaniczne i elektryczne. Drugą grupę procesów o mniejszym zakresie analiz diagnostycznych stanowią procesy termiczne, chemiczne i medyczne. Metody z estymacją parametrów (**pe**) i obserwatorami stanów (**ob**) należą do najczęściej używanych. Mniejszym zainteresowaniem cieszą się metody przestrzeni parzystości (**ps**). Sztuczne sieci neuronowe (**nn**) są używane stosunkowo rzadko. Więcej niż 50% uszkodzeń czujników jest wykrywanych przy użyciu metod typu **ob**. Do detekcji uszkodzeń elementów wykonawczych najczęściej używano metody z obserwatorami, natomiast metody typu **pe** i **nn** można znaleźć w mniejszej liczbie aplikacji. Metody oparte o przestrzeń parzystości oraz metody kombinowane są rzadko używane do detekcji uszkodzeń tego typu podzespołów. W detekcji uszkodzeń procesu najczęściej używane są metody typu **pe**. Ponad 50% rozpatrywanych aplikacji wykorzystuje tę metodę detekcji.

Dla procesów o charakterystykach nieliniowych spotyka się systemy diagnostyczne oparte o nieliniowe lub linearyzowane modele. Zainteresowanie diagnostyką takich procesów ciągle wzrasta. Coraz częściej proces diagnostyczny realizuje

się nieliniowym modelem. Spada natomiast zainteresowanie modelami zlinearyzowanymi.

Zainteresowanie zastosowaniem różnych metod detekcji w diagnostyce obiektów o nieliniowych charakterystykach w ostatnich latach ulega zmianie. Największy wzrost zastosowań wykazano w stosunku do sztucznych sieci neuronowych. Znaczny renesans przeżywały w latach 1994/95 metody z obserwatorami stanu i z estymatorami parametrów. Zastosowanie sieci neuronowych można rozpatrywać w dwóch aspektach: generacja residuów i klasyfikacja uszkodzeń na podstawie wektora symptomów.

2.2.2. Analityczne algorytmy diagnostyczne

Rozwiązanie problemu detekcji i lokalizacji uszkodzeń w statycznych i dynamicznych systemach metodami analitycznymi było tematem wielu prac. Duży wkład w rozwój tych metod detekcji wniosła praca Franka (1990), w której zaprezentowano wiele metod generacji residuów przy wykorzystaniu algorytmów teorii estymacji stanu. Interesującymi są prace zbiorowe pod redakcją Pattona *i in.* [110, 173], w których zaprezentowano przegląd znanych metod detekcji oraz wybrane ich zastosowania. Spośród metod wymienionych w literaturze szczególnie interesujące z praktycznego punktu widzenia jest podejście oparte na modelach matematycznych wykorzystujących filtr Kalmana, którego najważniejszymi zaletami są: prosta struktura, łatwość implementacji, uniwersalność oraz możliwość bezpośredniego generowania wektora residuów. Procedurę rozwiązania problemu detekcji i lokalizacji uszkodzenia można umownie podzielić na dwa etapy [55]:

- ◇ generacji residuów r - funkcji zawierających informację o wystąpieniu uszkodzenia,
- ◇ podjęcie decyzji o wystąpieniu uszkodzenia i ewentualna jego lokalizacja.

Ważnym elementem w procedurze detekcji uszkodzeń jest generacja wektora residuów. Wektor ten zawiera informacje umożliwiające sprawdzenie spełnienia wyznaczonych w warunkach znamionowych zależności pomiędzy wejściem i wyjściem systemu. Jeżeli występuje uszkodzenie, zależności redundancyjne nie są już spełnione i wektor residuów staje się niezerowy. Na jego podstawie zostaje podjęta decyzja, która może dotyczyć zarówno czasu wystąpienia uszkodzenia, jak i jego miejsca. Zwykle używa się dwóch sposobów generacji sygnałów zawierających informację o uszkodzeniu. W pierwszej używa się technik estymacji stanu, w drugiej natomiast estymacji parametrów [83, 84]. W większości zastosowań proces detekcji uszkodzeń jest zakończony, gdy zlokalizowano miejsce i czas wystąpienia uszkodzenia. Jednak w pewnych sytuacjach może być pożądana znajomość typu, rozmiaru i przyczyny uszkodzenia. Potrzebna jest do tego znajomość natury procesu, stopnia starzenia się, otoczenia, zużycia sprzętu itd. Zadanie to jest rozwiązywane za

pomocą systemów ekspertowych wyposażonych w inne podzespoły zbudowane w oparciu o elementy sztucznej inteligencji [227].

Detekcja uszkodzeń polega na stwierdzeniu, czy w nadzorowanym układzie występuje niesprawność/uszkodzenie. Metody detekcji uszkodzeń na bazie modeli matematycznych dynamicznie rozwijano przez ostatnie 20 lat. Rozpatrywane zadanie dotyczy detekcji uszkodzeń procesów przemysłowych, elementów wykonawczych i układów pomiarowych. Rozwiązanie polega na znalezieniu zależności między różnymi pomiarowo dostępnymi sygnałami [12, 88, 173]. Niezbędne zależności są wyznaczane za pomocą matematycznych modeli procesu.

Na bazie mierzonych sygnałów wejściowych $u(t)$ i wyjściowych $y(t)$ metody detekcji realizują zadanie:

- ◇ generacji residuów r [66],
- ◇ estymacji stanu \hat{x} [95, 109, 112],
- ◇ estymacji parametrów Θ [95, 139].

Wyznaczone wielkości nazywane są cechami procesu. W zależności od metod lokalizacji do porównania z cechami określonymi dla normalnego stanu procesu wykorzystuje się je pojedynczo lub łącząc w grupy, uzyskując w efekcie symptomy uszkodzenia s . Detekcja uszkodzeń obserwowanych elementów wymaga zatem zdefiniowania wektora symptomów. W tym celu można zastosować wybrane metody analityczne.

Analityczne algorytmy detekcji uszkodzeń można podzielić na kilka grup [12, 188]:

I. Realizujące funkcję generacji residuów:

1. Elementarne - do najbardziej znanych należy zaliczyć:
 - ◇ detektory testowania limitów,
 - ◇ średnia ruchoma geometryczna typu GMA (ang. *Geometric Moving Average*),
 - ◇ średnia ruchoma skończona typu FMA (ang. *Finite Moving Average*),
 - ◇ filtrowane algorytmy różnicowe;
2. Oparte na teorii Bayesa, stosowane do rozwiązywania typowych problemów w trybie *on-line*. Pierwszy raz algorytmy te zastosował Girshick i Rubin (1952), a później Pollak i Siegmund (1985) oraz Pollak (1987) [188];
3. Uogólnionego ilorazu wiarygodności GLR (ang. *Generalized Likelihood Ratio*) [144];

4. Metody i algorytmy teorii sterowania.

W typowych układach pomiar wielu zmiennych stanu jest albo niemożliwy lub zbyt kosztowny. W rzeczywistości, tylko pewne stany lub ich kombinacje są mierzalne jako wyjście systemu. Koncepcja wprowadzenia do układów sterowania i diagnostyki obserwatorów stanu jest jednocześnie genialna i prosta [96]. Zasada polega na estymacji stanu na podstawie obserwacji wejść i wyjść systemu [56]. Układ realizujący zadanie estymacji stanu nazywamy obserwatorem.

◇ *obserwatory stanu.*

Metodę z obserwatorem stanu i wyjść typu Luenbergera [145] zastosował i opisał Clark (1979) [35]. Metoda zaliczana jest do deterministycznych i odpornych z dobrze opracowanym modelem [45, 96].

◇ *Filtr Kalmana.*

Dla obiektów nieliniowych dobre wyniki pozyskiwania cech procesu można osiągnąć przy wykorzystaniu filtrów Kalmana [98]. Filtry te pozwalają estymować wektor stanu procesy metodami stochastycznymi. Wymagają, niestety, spełnienia kilku założeń w stosunku do charakteru zakłóceń sygnałów pomiarowych. Filtr Kalmana zaliczany jest do grupy filtrów optymalnych [25, 111].

◇ *Filtr Kalmana w układach detekcji.*

Ważnym elementem w procedurze detekcji uszkodzeń jest generacja residuów. Wektor ten zawiera informacje umożliwiające sprawdzenie spełnienia wyznaczonych w warunkach znamionowych zależności pomiędzy wejściem i wyjściem systemu. Zwykle używa się dwustopniowego algorytmu generacji sygnałów zawierających informację o uszkodzeniu. W pierwszym etapie, dla detekcji uszkodzenia, używa się technik estymacji stanu, a w drugim, dla lokalizacji uszkodzenia, dokonuje się estymacji parametrów. Problem generacji wektora residuów i detekcji uszkodzenia można rozwiązać, stosując algorytm filtru Kalmana i testu SPRT [188].

◇ *Rozszerzony Filtr Kalmana.*

Innymi cechami procesu wykorzystywanymi przy wyznaczaniu symptomów uszkodzeń są parametry procesu. Wyznaczanie parametrów wiąże się z identyfikacją parametrycznego modelu. Z literatury znane są różne metody identyfikacji procesu [49, 148]. Ostatnio do estymacji parametrów procesów nieliniowych często stosuje się rozszerzony filtr Kalmana [61, 111, 226, 235]. Zastosowanie metod estymacji parametrów do detekcji uszkodzeń w systemach technicznych opisali Hochmann (1977) [78], Bakiotis i in. (1979) [9], Geiger (1982) [62], Filbert i Metzger (1982) [52], Isermann (1993) [84] oraz Isermann i Freyermuth (1991) [89]. Estymowanie parametrów obiektu wymaga jednoczesnej estymacji stanu i parametrów, które traktowane są jak kolejne stany układu. Zadanie to jest zwykle sil-

nie nieliniowe, zbyt złożone przy bezpośrednim rozwiązywaniu bez dodatkowych założeń upraszczających [111].

◊ *Równania parzystości.*

Zastosowanie równań parzystości do detekcji uszkodzeń zaczęto analizować w nieco późniejszym okresie. Po raz pierwszy przedstawił je Chow i Willsky (1984) [31]. Dalszy rozwój tych metod opisują Patton i Chen (1991) [174], Gertler (1991,1997) [70, 64], Höfling i Pfeufer (1994) [79].

Aktualne zachowanie procesu jest porównywalne z oczekiwanym, uzyskanym na bazie modelu [86]. Odchylenia (residua) są sygnałem uszkodzeń (lub zakłóceń, szumów oraz błędów modelu). Metoda równań parzystości jest bezpośrednią implementacją takiej koncepcji [219]. Główne residua są formułowane jako różnice między aktualną odpowiedzią procesu i tą predyktowaną przez model [71, 72]. Jednymi z pionierów zastosowań relacji parzystości byli Himmelblau (1978) [77], Mach [146] i Stephanopoulos [209].

Pierwsze wyniki w dziedzinie diagnostyki lotniczej osiągnęli Potter i Suman (1977) [205], Willsky i współpracownicy [31, 41] oraz Massoumnia [149]. Z rozwojem równań parzystości dąży się do zaadoptowania naturalnych wymagań przyczynowości i stabilności generatora residuów. Te techniki były opisywane w serii artykułów [65, 67, 69, 84, 174, 218, 233].

II. Realizujące funkcję oceny stanu obiektu, oparte na kumulacji sum typu CUSUM (ang. *Cumulative Sum*), zaproponowane pierwszy raz przez Page (1954) [208]. Z tej grupy można wyróżnić trzy znane metody:

- ◊ intuicyjna,
- ◊ testu SPRT (ang. *Sequential Probability Ratio Test*),
- ◊ testu wielu hipotez.

2.3. Systemy tolerujące uszkodzenia

Bezpieczne systemy sterowania procesami produkcyjnymi umożliwiają pracę procesu w przypadku wystąpienia dowolnego pojedynczego uszkodzenia. Systemy takie charakteryzują się [21]:

- ◊ kontynuacją pracy pomimo wystąpienia pojedynczego uszkodzenia, lub odstawienia fragmentu procesu, jeśli jest taka możliwość lub to nie koliduje z poprawnym funkcjonowaniem pozostałych podzespołów procesu,
- ◊ redundancją sprzętową,

- ◊ porównywaniem sygnałów obiektowych uzyskanych z trzech czujników w systemie 2 z 3,
- ◊ pracą systemu cyfrowego sterowania z równoległym przetwarzaniem w kilku kanałach,
- ◊ podwójnymi (lub więcej) elementami wykonawczymi,
- ◊ dużymi kosztami realizacji i eksploatacji układów sterowania i monitorowania.

Tego typu systemy sterowania stosuje się w procesach, w których występuje zagrożenie dla życia ludzi (reaktory jądrowe) lub dla bardzo kosztownych procesów (programy kosmiczne). W procesach, w których cena bezpiecznego systemu sterowania jest porównywalna z ceną redundantnych podzespołów procesu, stosuje się systemy tolerujące uszkodzenia FTC (ang. *Fault Tolerance Control*) [21, 207, 221, 224]. Systemy tego typu mogą obniżyć własności procesu w przypadku wystąpienia uszkodzenia, jednakże uszkodzenie to nie doprowadzi systemu do awarii. Takie działanie systemu tolerującego uszkodzenia jest możliwe, jeśli system ma możliwość przeciwdziałania skutkom uszkodzenia poprzez odpowiednie zmiany w algorytmach sterowania. Systemy FTC cechuje:

- ◊ przeciwdziałanie awarii wywołanej pojedynczym uszkodzeniem,
- ◊ zastosowanie redundancji informacyjnej do detekcji uszkodzeń,
- ◊ zastosowanie rekonfiguracji w komponentach programowych systemu sterowania w celu przeciwdziałania uszkodzeniom,
- ◊ akceptacja obniżenia własności (degradacji) procesu spowodowana uszkodzeniem, ale utrzymanie zdolności do pracy obiektu,
- ◊ niski koszt realizacji systemu sterowania w tego typu układach stosuje się tylko redundancję programową.

Systemy sterowania tolerujące uszkodzenia mogą być implementowane metodą *ad hoc*, ale poprawna praca takiego typu systemu wymaga implementacji z systematycznymi procedurami i dobrze zdefiniowaną architekturą [91].

Typowa architektura systemów FTC ma strukturę hierarchiczną trójwarstwową. Najniższa warstwa pełni funkcje pętli sterowania typu BSC (Bezpośrednie Sterowanie Cyfrowe). Warstwa druga realizuje zadanie diagnostyczne z wykorzystaniem układów detekcji uszkodzeń czujników, elementów wykonawczych oraz podzespołów sterowanego procesu. Ta warstwa zawiera określoną liczbę detektorów, zazwyczaj jeden dla każdego wyizolowanego uszkodzenia, i efektorów, które realizują pożądaną rekonfigurację lub inne działania naprawcze inicjowane przez autonomiczny kontroler. W warstwie trzeciej zastosowano autonomiczny kontroler realizujący zadanie porównania stanu aktualnego badanego systemu ze stanem

pożądanym. Kontroler funkcjonalnie zawiera: łącza do detektorów w celu detekcji zmian, łącza do warstwy wyższej, wymagane procedury rekonfiguracyjne lub inne akcje naprawcze do zaadoptowania systemu w warunkach pracy z uszkodzeniem oraz procedury generowania sygnałów dla warstwy nadrzędnej. Taka struktura pozwala na rozwój każdej warstwy niezależnie.

2.4. Zakończenie

W podsumowaniu należy stwierdzić, że z analizy publikacji z ostatnich lat wynika duże zainteresowanie metodami detekcji z wykorzystaniem obserwatorów stanu i estymatorów parametrów. Ponadto istnieje ciągły wzrost zainteresowania zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych oraz teorii zbiorów rozmytych w detekcji uszkodzeń różnych złożonych systemów przemysłowych. Można sądzić, że dla różnych złożonych systemów najbardziej uniwersalne, przy zachowaniu skuteczności detekcji, okazują się zintegrowane układy diagnostyczne realizujące zadania w oparciu o metody analityczne, sztuczne sieci neuronowe i elementy logiki rozmytej. W diagnostyce procesów stosowane są metody oparte na analizie własności obiektu w stanie ustalonym oraz z uwzględnieniem dynamiki. Wykazują one różne własności z punktu widzenia możliwości zastosowań jak również skuteczności podejmowanych diagnoz.

Dokonyjąc analizy własności głównych grup metod diagnostycznych [188] warto zauważyć, że we wszystkich grupach realizowane są główne zadania, w których istotą jest podejmowanie decyzji dotyczących sprawności diagnozowanego obiektu. W niektórych natomiast realizowane są ponadto dodatkowe funkcje takie jak: analiza własności obiektu oraz modelowanie wybranych bloków lub całych procesów.

Zakres zmiennych stosowanych w procesie diagnostycznym stanowi kolejne kryterium analizy metod. Ogólnie w omawianych metodach diagnostycznych prowadzona jest weryfikacja poprawności funkcjonowania obiektu przy użyciu sygnałów deterministycznych lub probabilistycznych. Jakość metod diagnostycznych często ocenia się używając dwóch wskaźników jakości: wiarygodność diagnoz i prostota realizacji technicznej. Stanowią one kryteria konkurencyjne. Duża wiarygodność wybranej grupy metod najczęściej wiąże się z dużą złożonością systemu diagnostycznego.

Analiza cech poszczególnych grup metod diagnostycznych pozwala wnioskować o braku uniwersalności metod diagnostycznych. Dobra jakość diagnozy i określona struktura układu diagnostycznego zawsze jest dedykowana dla procesu o określonych cechach (statyczny lub dynamiczny, liniowy lub nieliniowy, zdeterminowany lub stochastyczny).