

METODY I SYSTEMY MONITOROWANIA STANU PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. Omówiono zadania systemów bieżącej diagnostyki nazywanych także systemami monitorowania stanu procesów przemysłowych. Scharakteryzowano specyfikę diagnozowanych obiektów. Przedstawiono metody detekcji i lokalizacji uszkodzeń wykorzystywane w tych systemach. Zaprezentowano przykładowe rozwiązanie - system DIAG - opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej.

Abstract. In the paper the on-line diagnosis systems – called also as a process state monitoring systems – is discussed. The specific features of diagnosed systems were underlined. Fault detection and isolation methods applied in those systems were pointed out. Exemplary solution – the DIAG system – worked out in the Institute of Automatic Control and Robotics of Warsaw University of Technology was presented.

1. WPROWADZENIE

W chwili obecnej rozpowszechnione są w przemyśle są **systemy monitorowania przebiegu procesu technologicznego**. Realizują one typowe funkcje wizualizacji i nadzoru procesu, takie jak: graficzna wizualizacja bieżących wartości zmiennych procesowych na schematach synoptycznych instalacji, wyświetlanie przebiegów zmiennych procesowych, wykrywanie i sygnalizacja zdarzeń i alarmów, wyliczanie wskaźników statystycznych i syntetycznych charakteryzujących przebieg procesu, raportowanie, itp. Takie funkcje monitoringu procesu realizują systemy SCADA, a także (obok funkcji regulacji i sterowania) systemy zintegrowane (DCS i hybrydowe).

W instalacjach technologicznych w przemyśle energetycznym, chemicznym, hutniczym, spożywczym i wielu innych pomimo stosowania elementów o dużej niezawodności nieuchronnie są jednak uszkodzenia komponentów instalacji technologicznej, urządzeń pomiarowych i wykonawczych, a także błędy obsługi operatorskiej. Powodują one znaczne i długotrwałe zakłócenia przebiegu procesu produkcyjnego, zmniejszające jego wydajność, a czasami prowadzą do zatrzymania procesu. Straty ekonomiczne w takich przypadkach są bardzo duże. Niektóre uszkodzenia prowadzą do stanów awaryjnych, np. zniszczenia instalacji technologicznej, skażenia środowiska naturalnego, a także mogą stanowić zagrożenie dla życia ludzi. Oprócz uszkodzeń katastroficznych w procesach zachodzą często negatywne zjawiska wolnozmiennie. Skutki ich działania mogą przez dłuższy czas pozostać niezauważone przez obsługę.

W systemach SCADA i DCS do rozpoznawania stanów nienormalnych i awaryjnych służy moduł sygnalizacji alarmów, stanowiący prostą wersję systemu diagnostycznego.

Stosowane powszechnie sposoby wykrywania i sygnalizacji alarmów mają jednak wiele wad:

- duża liczba alarmów sygnalizowanych w krótkim przedziale czasu w przypadku powstania groźnych uszkodzeń, powodująca zjawisko przeciążenia informacyjnego operatorów,
- brak możliwości detekcji wielu parametrycznych uszkodzeń oraz duże opóźnienia detekcji wynikające ze stosowania wyłącznie prostych metod kontroli ograniczeń zmiennych procesowych,
- brak mechanizmów wnioskowania gwarantujących możliwość formułowania diagnoz o uszkodzeniach,
- niedogodności sposobu prezentacji alarmów: uszkodzenie objawia się zazwyczaj wystąpieniem wielu alarmów na różnych obrazach synoptycznych i standardowych, natomiast alarmy będące skutkiem różnych uszkodzeń sygnalizowane mogą być równocześnie na tym samym obrazie synoptycznym.

Powyższe niedogodności utrudniają operatorom wypracowanie diagnozy, tj. identyfikację przyczyny zaistnienia zbioru alarmów, która w wielu przypadkach jest niezbędna do podjęcia właściwej akcji zabezpieczającej. Wypracowanie właściwej diagnozy zależy zatem tylko od wiedzy, doświadczenia i stanu psychofizycznego operatora.

Niedoskonałość systemów alarmowych jest przyczyną rozwoju systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych. Zadaniem tych systemów jest wykrywanie i rozpoznawanie wszelkich zdarzeń wpływających destrukcyjnie na przebieg procesu, w tym uszkodzeń komponentów instalacji technologicznej, urządzeń pomiarowych i urządzeń wykonawczych. Systemy takie będziemy również określać jako **systemy monitorowania stanu procesów przemysłowych**. Pełnią one następujące funkcje:

- modelowanie elementów instalacji technologicznej i realizacja wirtualnych sensorów (np dla zmiennych pomiarowo niedostępnych) i analizatorów bazujących na modelach
- redundancja informacyjna pomiarów i walidacja torów pomiarowych
- predykcja wartości zmiennych procesowych z zastosowaniem modeli
- detekcja uszkodzeń (urządzeń technologicznych, pomiarowych i wykonawczych)
- lokalizacja uszkodzeń
- wizualizacja stanu technicznego procesu
- wspomaganie decyzji operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych.

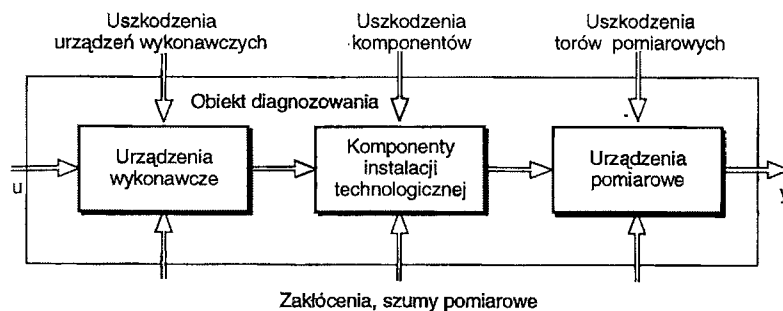
W wymienionych powyżej algorytmach nadzorowania procesów stosowane są coraz częściej techniki sztucznej inteligencji: sieci neuronowe, logika rozmyta, zbiory przybliżone, algorytmy genetyczne.

2. SPECYFIKA DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Zadaniem diagnostyki procesów przemysłowych jest wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń aparatów technologicznych, urządzeń wykonawczych i pomiarowych na bieżąco w trakcie funkcjonowania procesu. Obiektem diagnozowania są instalacje technologiczne wraz z urządzeniami wykonawczymi i pomiarowymi oraz procesy

zachodzące w tych instalacjach. Schemat obiektu diagnozowania został przedstawiony na rys.1.

Typowymi obiektami diagnozowania są instalacje w przemyśle chemicznym, energetycznym, ciepłowniczym farmaceutycznym, spożywczym i innych. Są to obiekty złożone, w których liczba możliwych uszkodzeń jest bardzo duża. Poszczególne instalacje różnią się między sobą znacznie. W systemach automatyki sterujących i monitorujących te procesy dostępne są duże zbiory danych pomiarowych, przydatnych do budowy modeli procesów. Reprezentują one jednak głównie dane w stanach bez uszkodzeń. Brak jest danych dla większości stanów z uszkodzeniami. Natomiast groźne uszkodzenia występujące po raz pierwszy powinny być szybko rozpoznane.



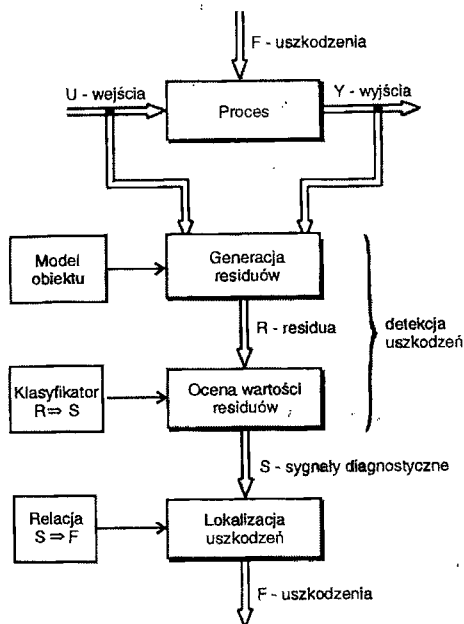
Rys.1. Schemat obiektu diagnozowania

Systemy diagnostyczne wprowadzane są dla już zautomatyzowanych procesów przemysłowych. Zdecydowana większość sygnałów pomiarowych niezbędnych do diagnozowania jest doprowadzona do komputera dla potrzeb sterowania procesem, obliczania wskaźników techniczno-ekonomicznych itp. Dane pomiarowe do systemu diagnostycznego doprowadzane są zwykle na drodze transmisji cyfrowej pomiędzy systemem automatyki a komputerowym systemem diagnostycznym. Zmniejsza to wymagane nakłady finansowe na realizację funkcji diagnostycznych.

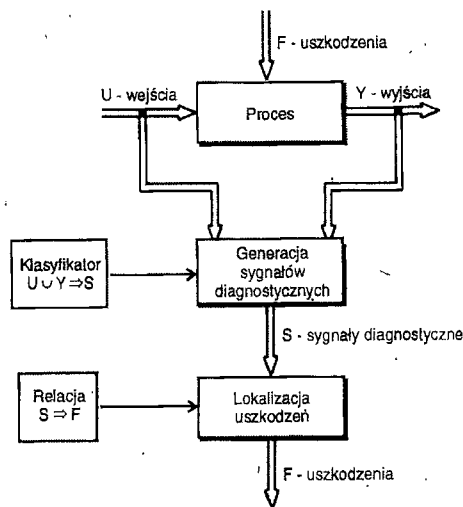
3. SCHEMAT SYSTEMU WNIOSKOWANIA DIAGNOSTYCZNEGO

W procesie diagnozowania wyróżniane są trzy fazy: detekcji, lokalizacji oraz identyfikacji uszkodzeń [16,23]. W fazie detekcji w wyniku przetwarzania zmiennych procesowych z wykorzystaniem modeli obiektu lub bez zastosowania modeli wykrywane są symptomy uszkodzeń (rys.3 i 4). W przypadku zastosowania modeli (rys. 3) detekcja polega najczęściej na wyliczeniu różnicy między wartością sygnału mierzonego y a wyjściem modelu y_M oraz ocenie tej rozbieżności. Różnica między sygnałem mierzonym, a modelowanym nazywana jest residuum r (rys.5). W stanie normalnym wartość residuum jest bliska zera, natomiast po wystąpieniu uszkodzenia w kontrolowanej części obiektu wartość residuum odbiega od zera. Rezultatem kwantyzacji wartości residuum, w celu dokonania jego oceny, są sygnały diagnostyczne, na podstawie których prowadzona jest lokalizacja uszkodzeń. Symptodem uszkodzenia jest wystąpienie takiej wartości sygnału diagnostycznego, która świadczy o powstaniu uszkodzenia w kontrolowanej części obiektu.

W przypadku detekcji prowadzonej bez wykorzystania modeli procesu (rys. 4), symptomy uszkodzeń są wykrywane na podstawie kontroli prostych relacji między sygnałami mierzonymi oraz na podstawie oceny parametrów sygnałów (tzw. zmiennych procesowych).



Rys.3. Schemat diagnozowania z wykorzystaniem modeli procesu



Rys.4. Schemat diagnozowania bez wykorzystania modeli procesu

W fazie lokalizacji na podstawie wykrytych symptomów oraz znajomości relacji między uszkodzeniami i symptomami wypracowywane są diagnozy. Wskazują one zaistniałe uszkodzenia. Faza identyfikacji polega na bardziej szczegółowym określeniu uszkodzenia, np. rozmiaru i miejsca powstałego wycieku z instalacji. W praktyce faza identyfikacji występuje rzadko, a czasami jest łączona z fazą lokalizacji uszkodzenia. Na podstawie diagnoz system może dodatkowo doradzać obsłudze, przekazując instrukcje postępowania w stanach awaryjnych.

4. METODY DETEKCCI USZKODZEŃ

Detekcja uszkodzeń jest procesem generacji sygnałów diagnostycznych S na podstawie znanych zmiennych wejściowych U i wyjściowych Y procesu w celu wykrywania uszkodzeń. Zadaniem algorytmów detekcyjnych jest zatem ekstrakcja symptomów. Sygnały diagnostyczne powinny zawierać informację o uszkodzeniach. Podczas detekcji następuje odwzorowanie przestrzeni zmiennych procesowych $X = \{Y, U\}$ w przestrzeń sygnałów diagnostycznych S . Wykrycie symptomu może być sygnalizowane w postaci alarmu oraz powinno inicjować procedurę lokalizacji uszkodzeń. W diagnostyce procesów detekcja uszkodzeń realizowana jest automatycznie przez komputer diagnozujący.

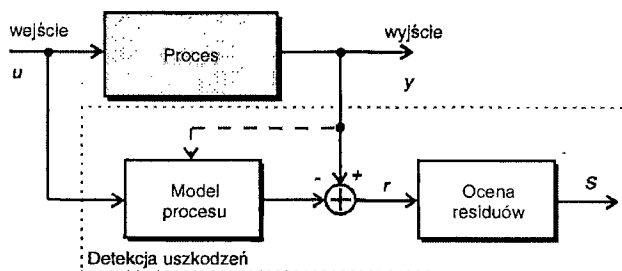
Metody detekcji uszkodzeń można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody wykorzystujące związki między zmiennymi procesowymi oraz metody bazujące na kontroli parametrów zmiennych procesowych. Metody bazujące na związkach między zmiennymi procesowymi wymagają pozyskania wiedzy o obiekcie w postaci modeli ilościowych lub jakościowych. Do detekcji wykorzystywane są modele analityczne, neuronowe i rozmyte. Sygnały diagnostyczne generowane są także na podstawie kontroli prostych związków między zmiennymi procesowymi, takich jak: redundancja sprzętowa torów pomiarowych, kontrola sygnałów sprzężeń zwrotnych, kontrola relacji między wartościami zmiennych, kontrola zgodności kierunków zmian sygnałów itp. [17,23]. Wiedza o tego typu zależnościach jest dobrze znana technologom, automatykom i operatorom procesów, a algorytmy są bardzo proste do implementacji.

W metodach należących do drugiej grupy symptomy uszkodzeń są wykrywane wyłącznie na podstawie analizy i oceny przebiegów poszczególnych zmiennych procesowych. Kontrolowane są zwykle ograniczenia (granice wiarygodności, granice alarmowe, dopuszczalna szybkość zmian) poszczególnych zmiennych lub prowadzona jest analiza statystyczna lub spektralna zmiennych, której zadaniem jest wykrywanie zmian stanowiących symptomy uszkodzeń. Metody te są stosunkowo proste, gdyż nie wymagają wiedzy w postaci modeli procesów. Ich wady wynikają z ograniczonej informacji diagnostycznej niesionej przez pojedynczy sygnał, a także wielości i niejednoznaczności przyczyn zmian parametrów sygnałów, co utrudnia określenie związków między symptomami a uszkodzeniami.

Metody detekcji uszkodzeń bazujące na modelach umożliwiają znacznie szybsze wykrywanie powstających uszkodzeń w porównaniu z innymi metodami, w tym uszkodzeń drobnych, niewykrywalnych metodami klasycznymi.

4.1. Detekcja uszkodzeń na podstawie modeli obiektu

Najbardziej zaawansowane metody detekcji uszkodzeń wykorzystują modele obiektu do generacji residuów. Schemat algorytmu detekcyjnego (testu) został podany na rys. 5.



Rys.5. Schemat detekcji uszkodzeń na podstawie modelu obiektu

Algorytm testu składa się z dwóch części. W części pierwszej wyliczana jest wartości residuum na podstawie modelu obiektu, a w części drugiej następuje ocena tej wartości oraz generacja sygnału diagnostycznego:

Wykorzystywane są różne rodzaje modeli: analityczne, neuronowe i rozmyte. Residuum wyznaczane jest jako:

- różnica między wartością mierzoną zmiennej procesowej a wartością obliczoną na podstawie modelu
- różnica między lewą i prawą stroną równania opisującego obiekt
- różnica między wartością nominalną i estymowaną parametru modelu obiektu.

4.1. Metody analityczne

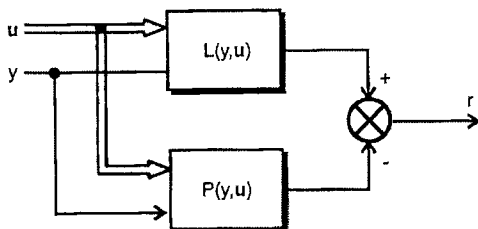
W grupie analitycznych metod detekcji uszkodzeń wyróżnić można:

- detekcję z wykorzystaniem modeli fizycznych (bilansowych, równań ruchu itp.) [16,23],
- detekcję z wykorzystaniem modeli liniowych typu wejście – wyjście w postaci transmitancji [9,10,16,23,29] lub równań stanu [4,16,29],
- detekcję z wykorzystaniem obserwatorów stanu lub filtrów Kalmana [3,5,6,7,16,29],
- detekcję na podstawie identyfikacji on-line [11,12,16,29].

Najpełniejszy model obiektu uzyskać można bezpośrednio z równań fizycznych, np. równań bilansowych. Model taki odzwierciedla własności obiektu w całym zakresie pracy. Modele fizyczne są często nieliniowe, uwikłane względem sygnału wyjściowego y . Jeśli równanie obiektu ma następującą postać $L(y, \mathbf{u}, t) = P(y, \mathbf{u}, t)$, to residuum jest generowane jako różnica między lewą L i prawą P stroną równania:

$$r = L(y, \mathbf{u}, t) - P(y, \mathbf{u}, t) \quad (1)$$

Schemat generacji residuów został podany na rys.6



Rys. 6. Schemat generacji residuów na podstawie równań fizycznych

Generacja residuów na bazie równań fizycznych, zwykle nieliniowych stanowi najbardziej pewną metodę detekcji, o ile model jest odpowiednio dokładny. Dla wielu obiektów opracowanie modeli na podstawie równań fizycznych jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe, a identyfikacja parametrów dostarcza dodatkowych trudności. To ogranicza zastosowanie tej metody do obiektów, które są opisane stosunkowo prostymi zależnościami.

Do generacji residuów wykorzystywane są różnego rodzaju liniowe modele obiektów. Są to ciągłe lub dyskretne: transmitancje [9,10,16,23], równania stanu [3,4,16,29], obserwatory stanu lub filtry Kalmana [3,5,6,7,16,29]. Przykładowo jeśli znane są transmitancje obiektu, to dla obiektu o jednym wejściu u i jednym wyjściu y residuum wyliczane jest w postaci następującej (zwanej równaniem zgodności):

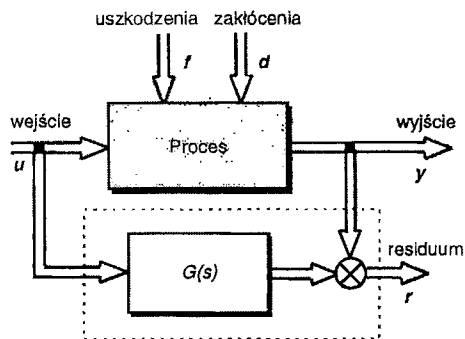
$$r(s) = y(s) - G(s)u(s), \quad (2)$$

gdzie: $G(s)$ jest transmitancją operatorową obiektu. Na rys.7 przedstawiono schematy wyliczania residuów odpowiadające formule (2).

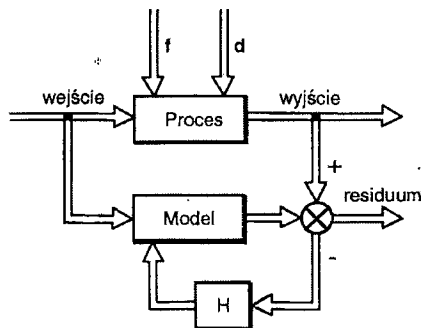
Dodatkowe residua (tzw. residua wtórne) uzyskujemy przez wymnożenie residuów pierwotnych przez odpowiednio dobrane transformaty $V(s)$:

$$\mathbf{r}^*(s) = \mathbf{V}(s)r(s) = \mathbf{V}(s)[y(s) - G(s)u(s)]. \quad (3)$$

Transformaty V dobierane są w taki sposób, aby zapewnić wrażliwości poszczególnych residuów tylko na określone uszkodzenia i brak wrażliwości na inne uszkodzenia oraz zakłócenia. Zostało to omówione w książkach [7,10,16,23,29].



Rys. 7. Schemat generacji residuów na podstawie równań zgodności f – uszkodzenia, d – zakłócenia



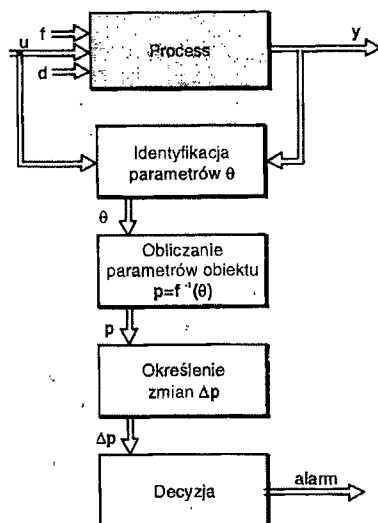
Rys. 8. Detekcja uszkodzeń z wykorzystaniem obserwatora stanu.

W klasycznym przypadku zastosowania modelu obiektu do generacji residuów wyjście obiektu wyliczane jest na podstawie sygnałów wejściowych. W obserwatorze stanu do estymacji wyjść oprócz sygnałów wejściowych wykorzystywane są również mierzone wyjścia. Idea obserwatora stanu (rys. 8) polega na zastosowaniu sprzężenia zwrotnego od różnicy pomiędzy estymowanymi i rzeczywistymi wyjściami obiektu, do poprawy modelu przez odpowiednio dobraną macierz sprzężenia zwrotnego H . Sprzężenie zwrotne jest potrzebne do kompensacji różnych warunków początkowych oraz do stabilizacji obserwatora, w przypadku obiektów niestabilnych. Gwarantuje on zbieżność błędu estymacji do zera dla dowolnych warunków początkowych. Estymowane przez obserwator sygnały wyjściowe są porównywane z sygnałami rzeczywistymi, a różnice stanowią residua (rys. 8).

Metody wykorzystujące liniowe modele obiektu umożliwiają wczesne wykrywanie nawet niewielkich uszkodzeń parametrycznych. Okupione jest to jednak koniecznością określenia odpowiednio dokładnych modeli, co nieraz jest bardzo trudne. Residua muszą być odpowiednio czułe na uszkodzenia, natomiast powinny być dostatecznie niewrażliwe na inne zmiany takie jak naturalne zakłócenia w procesie, szумы pomiarowe, błędy modelowania. Modele liniowe określają własności obiektu w otoczeniu punktu pracy, zatem każda zmiana tego punktu może powodować, podobnie jak uszkodzenia, wystąpienie wartości residuów odbiegających od zera.

Uszkodzenia objawiają się nie tylko jako zmiany wartości wyjść obiektu, ale także jako zmiany współczynników fizycznych p występujących w równaniach ruchu, takich jak rezystancje, pojemności, sztywności itp. Te współczynniki fizyczne są zawarte w parametrach θ modelu procesu. Jeśli na podstawie prowadzonej na bieżąco identyfikacji modelu procesu określimy wartości tych współczynników i porównamy je z wartościami nominalnymi, to znaczy wartościami parametrów procesu w stanie zdadności, to uzyskane różnice są residuami niosącymi informację o uszkodzeniach. Ta metoda detekcji uszkodzeń została zaproponowana i rozwinięta przez Isermanna [12] oraz jego współpracowników [11].

Schemat detekcji uszkodzeń bazujący na identyfikacji on-line parametrów modelu procesu został przedstawiony na rys.9.



Rys.9. Detekcja uszkodzeń na podstawie identyfikacji on-line

Aby metoda ta prowadziła do dobrych wyników, niezbędne jest uzyskanie dokładnego modelu procesu za pomocą modelowania teoretycznego oraz przeprowadzenie wiarygodnej identyfikacji parametrów modelu procesu. Identyfikacja wymaga odpowiedniego pobudzenia obiektu, tak aby dane pomiarowe pochodziły z całego obszaru jego pracy. Wadą metody są duże nakłady obliczeniowe związane z koniecznością bieżącej identyfikacji parametrów modelu procesu, a także problemy z wykrywaniem uszkodzeń addytywnych.

4.2. Metody wykorzystujące modele neuronowe i rozmyte

W ostatnim okresie intensywnie rozwijane są metody detekcji uszkodzeń wykorzystujące modele neuronowe [1,14,15,16,21,23,24,25,28] i rozmyte [8,16,21,23] oraz ich kombinacje [16,21,23]. Modele takie strojone są na podstawie danych pomiarowych rejestrowanych w trakcie eksploatacji obiektu. Metody detekcji bazujące na modelach neuronowych i rozmytych mogą być stosowane między innymi dla obiektów, dla których uzyskanie modeli analitycznych jest bardzo skomplikowane lub niemożliwe. Residua są generowane zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.5.

Istotną zaletą technik rozmytych i neuronowych jest możliwość modelowania obiektów nieliniowych. Modele obiektów w stanie pełnej zdatności uzyskiwane są na podstawie danych eksperymentalnych z zastosowaniem różnych technik uczenia. Modele te dobrze odwzorowują funkcjonowanie obiektu w zakresie zmienności sygnałów, na podstawie których były uczone.

W zautomatyzowanych procesach przemysłowych dostępne są zarówno bieżące dane pomiarowe, jak również wartości archiwizowanych zmiennych procesowych.

To stwarza dogodną sytuację do budowy modeli na podstawie danych pomiarowych z obiektu oraz wiedzy eksperta o powiązaniach między zmiennymi (strukturze modelu). Jednocześnie gwałtowny rozwój techniki komputerowej zlikwidował istotną barierę, związaną ze znacznymi nakładami obliczeniowymi na strojenie modeli rozmytych i neuronowych z wykorzystaniem dużych zbiorów danych.

Sieci neuronowe są „czarną skrzynką”. Poszczególne elementy struktury, a także wagi nie mają fizycznego związku ze strukturą i parametrami obiektu. Wiedza eksperta wykorzystana może być jedynie do określenia zbioru sygnałów wejściowych potrzebnych do modelowania danego sygnału wyjściowego. Jednak ważnymi zaletami sieci neuronowych są: duża odporność na zakłócenia oraz zdolność do uogólniania wiedzy zawartej w sieci.

Zaletą modeli rozmytych i rozmytych sieci neuronowych jest możliwość połączenia wiedzy eksperckiej oraz dostępnych danych pomiarowych. Wiedza ekspercka służy do określenia struktury oraz początkowych wartości parametrów modelu. Model nie stanowi czarnej skrzynki. Jest on zbiorem reguł, które ekspert może interpretować i weryfikować. Liczba reguł w modelach rozmytych rośnie gwałtownie ze wzrostem liczby wejść oraz liczby zbiorów rozmytych dla poszczególnych wejść. To ogranicza ich zastosowanie do obiektów stosunkowo prostych. Jednak w diagnostyce procesów przemysłowych wykorzystywane są modele jak najmniejszych części procesu, i dlatego ograniczenie to nie jest takie istotne. Zbiór modeli powinien oczywiście pokrywać cały obiekt.

4.3. Inne metody detekcji uszkodzeń

Do detekcji uszkodzeń wykorzystywane są także proste związki między zmiennymi procesowymi, takie jak: redundancja sprzętowa torów pomiarowych, kontrola sygnałów sprzężeń zwrotnych, kontrola relacji między wartościami zmiennych, kontrola zgodności kierunków zmian sygnałów itp. [23]. W celach diagnostycznych sprawdzane mogą być wartości parametrów statystycznych zmiennych procesowych. Dla obiektów wirujących standardowo stosowana jest analiza spektralna sygnałów.

Kontrola wartości granicznych zmiennych analogowych [27] jest klasycznym sposobem wykrywania uszkodzeń. Kontrolowane mogą być ograniczenia bezwzględne lub też względne, odniesione do wartości zadanej. Sprawdzana jest także szybkość zmian sygnałów oraz zgodność ze stanem odniesienia wartości sygnałów binarnych.

W metodach kontroli ograniczeń symptomy uszkodzeń są wykrywane wyłącznie na podstawie oceny wartości jednej zmiennej procesowej. Algorytmy detekcji są bardzo proste, gdyż nie wymagają wiedzy w postaci modeli procesów. Ich wady wynikają z ograniczonej informacji diagnostycznej niesionej przez pojedynczy sygnał, a także wielości i niejednoznaczności przyczyn zmian parametrów sygnałów, co utrudnia określenie związków między symptomami a uszkodzeniami.

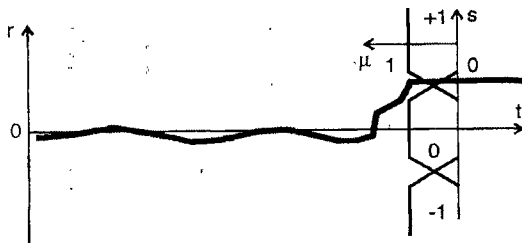
4.4. Algorytmy podejmowania decyzji o wykryciu uszkodzenia

Każdy algorytm detekcji uszkodzeń zawiera część decyzyjną, w której podejmowana jest decyzja o wykryciu uszkodzenia wraz z ewentualną sygnalizacją tego zdarzenia w postaci alarmu. W przypadku, gdy sygnał diagnostyczny przyjmuje wartość świadcząca o powstaniu jednego z uszkodzeń wykrywanych przez ten sygnał, to mówimy, że wystąpił symptom uszkodzenia.

Najprostszym algorytmem decyzyjnym jest ocena progowa wartości residuów lub parametrów zmiennych procesowych. W celu zwiększenia odporności detekcji uszkodzeń na wpływ impulsowych zakłóceń elektromagnetycznych oddziałujących na sygnały pomiarowe należy decyzję podejmować nie na podstawie chwilowej wartości residuum, lecz jego wartości średniej w przesuwym oknie zawierającym N ostatnich wartości residuum.

Inne analityczne metody wykrywania zmian sygnałów zostały omówione w pracach [2,10,9]. Ocenę residuów można przeprowadzić także z zastosowaniem logiki rozmytej [8,16,23]. Rozmyta ocena wartości residuów umożliwia uwzględnienie niepewności wartości sygnałów diagnostycznych wynikającej z zakłóceń w procesie, szumów pomiarowych, błędów modelowania oraz trudności określenia wartości progowych.

Każdemu residuum r_j przyporządkować można zmienną lingwistyczną opisującą wartości sygnału diagnostycznego. Przestrzeń zmiennej lingwistycznej V_j jest zbiorem wszystkich wartości lingwistycznych stosowanych do oceny tej zmiennej. Poszczególnym wartościom zmiennej lingwistycznej odpowiadają zbiory rozmyte rozpięte na osi residuum. W najprostszym przypadku zbiór V_j zawiera dwie wartości 0 oznaczający brak symptomu i 1 oznaczający wystąpienie symptomu $V_j = \{0, 1\}$. Na rys. 10 przedstawiono rozmytą trójwartościową ocenę residuów $V_j = \{0, -1, +1\}$.



Rys.10. Rozmyta trójwartościowa ocena residuów

Przy takim podejściu sygnały diagnostyczne są zbiorami rozmytymi. Ogólny wzór określający rozmyty, wielowartościowy sygnał diagnostyczny jest następujący:

$$s_j = \{ \langle v_{ji}, \mu_{ji} \rangle : v_{ji} \in V_j \}, \quad (4)$$

gdzie: μ_{ji} - funkcja przynależności wartości j -tego residuum do zbioru rozmytego v_{ji} ,

V_j - zbiór wartości lingwistycznych j -tego sygnału diagnostycznego.

Wartość rozmytego sygnału diagnostycznego określona jest zatem przez współczynniki przynależności wyliczonej wartości residuum do określonych zbiorów rozmytych.

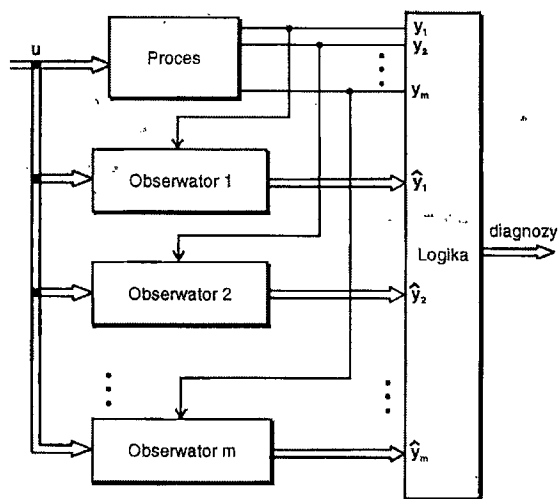
5. METODY LOKALIZACJI USZKODZEŃ

Lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest na podstawie sygnałów diagnostycznych generowanych przez algorytmy detekcyjne. Wynikiem lokalizacji jest diagnoza wskazująca uszkodzenia. Nie zawsze jest możliwe całkowicie pewne i jednoznaczne wskazanie istniejących uszkodzeń. Spowodowane to jest niepełną i niepewną wiedzą o obiekcie, ograniczoną rozróżnialnością uszkodzeń, niepewnością sygnałów diagnostycznych itp.

Do lokalizacji uszkodzeń niezbędna jest znajomość relacji między wartościami sygnałów diagnostycznych a uszkodzeniami. Istotne znaczenie ma sposób pozyskania wiedzy o relacji uszkodzenia – symptomy. W przypadku ogólnym może być ona, uzyskana [16,23]: na podstawie struktury modeli matematycznych obiektu projektowanych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń, w wyniku uczenia oraz na podstawie wiedzy eksperckiej.

5.1. Charakterystyka stosowanych metod

Istnieje duża różnorodność stosowanych metod lokalizacji. Większość stosowanych metod zakłada, że znane są modele obiektu tylko dla stanu normalnej jego pracy (bez uszkodzeń). Do detekcji uszkodzeń stosowane są zbiory algorytmów detekcyjnych wykorzystujących różne rodzaje modeli obiektu. Przykładem takiego rozwiązania są banki obserwatorów DOS lub GOS [5,6,7], w których do detekcji uszkodzeń stosowane są obserwatory stanu, a lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest na podstawie binarnych sygnałów diagnostycznych z zastosowaniem prostych funkcji logicznych. Strukturę banku obserwatorów DOS pokazano na rys. 11.

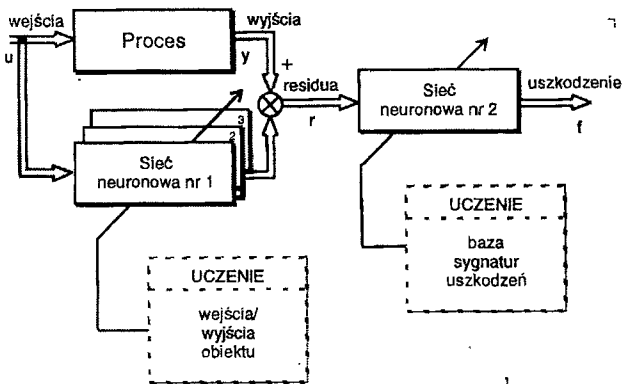


Rys.11. Diagnostyka uszkodzeń z wykorzystaniem banku obserwatorów stanu DOS.

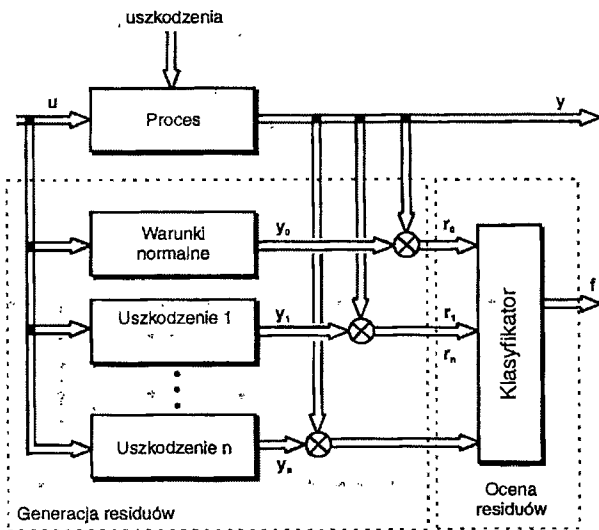
Innym rozwiązaniem jest zastosowanie sieci neuronowych zarówno do detekcji jak też do lokalizacji uszkodzeń [16,23]. Taki schemat diagnozowania pokazano na rys. 12.

W tym przypadku sieci neuronowe modelujące określone części obiektu uczone są na podstawie danych dla stanu normalnej pracy, ale sieć neuronowa prowadząca klasyfikację uszkodzeń wymaga strojenia na podstawie danych dla stanów z uszkodzeniami.

Odmienne podejście do diagnostyki zakłada, że dla każdego stanu obiektu, tj. stanu pełnej zdatności oraz stanów z uszkodzeniami znane są modele funkcjonowania obiektu w tych stanach [16,28]. Schemat diagnozowania bazujący na banku modeli neuronowych obiektu dla stanu normalnego i stanów z uszkodzeniami został podany na rys. 13.



Rys.12. Diagnostyka obiektu z wykorzystaniem sieci detekcyjnych oraz klasyfikatora neuronowego.



Rys.13. Diagnostyka obiektu z wykorzystaniem banku sieci neuronowych dla stanów zdatności i stanów z uszkodzeniami oraz klasyfikatora neuronowego.

Zebranie danych pomiarowych dla wszystkich stanów z uszkodzeniami jest zwykle niemożliwe w przypadku procesów przemysłowych, w których poszczególne stany nienormalne i awaryjne występują rzadko, a jednocześnie stanowią duże zagrożenie dla bezpieczeństwa oraz przynoszą poważne straty ekonomiczne. Ponadto instalacje technologiczne w przemyśle chemicznym, energetycznym, spożywczym itp. są najczęściej rozwiązaniami jednostkowymi lub produkowanymi w krótkich seriach. Często podlegają zmianom konstrukcyjnym. Liczba możliwych uszkodzeń jest bardzo duża, a poszczególne defekty występują bardzo rzadko. To wszystko sprawia, że nie ma możliwości pozyskania ciągów danych uczących, reprezentujących poszczególne stany awaryjne. System diagnostyczny powinien natomiast wykrywać i rozpoznawać groźne

awarie, które nigdy wcześniej nie wystąpiły. Dlatego ten sposób diagnozowania stosowany jest rzadko, głównie dla urządzeń produkowanych seryjnie (np. silniki, zawory regulacyjne, pompy itp.), dla których pozyskanie danych pomiarowych, charakteryzujących stany z poszczególnymi uszkodzeniami jest możliwe.

Wiedzę o relacji uszkodzenia – symptomy można pozyskać także na podstawie struktury modeli matematycznych stosowanych do detekcji uszkodzeń, projektowanych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń na wyjścia obiektu. Modelowanie wpływu uszkodzeń, szczególnie komponentów instalacji technologicznej, jest bardzo trudne. Metody tej grupy mogą być stosowane dla stosunkowo prostych, dobrze rozpoznanych obiektów (np. silników elektrycznych), nie nadają się natomiast do diagnostyki złożonych instalacji technologicznych.

Dlatego w diagnostyce procesów przemysłowych największe znaczenie praktyczne mają metody wykorzystujące wiedzę ekspercką do zaprojektowania relacji uszkodzenia - symptomy. Dobra znajomość funkcjonowania obiektu umożliwia określenie tej zależności w sposób znacznie prostszy niż przez modelowanie wpływu uszkodzeń.

Modele stosowane do lokalizacji uszkodzeń powinny odwzorowywać przestrzeń wartości sygnałów diagnostycznych w dyskretną przestrzeń uszkodzeń. W przypadku zastosowania wiedzy eksperckiej odwzorowanie to przyjmuje postać: funkcji logicznych, reguł typu *jeśli-to*, binarnej macierzy diagnostycznej lub systemu informacyjnego [16,23]. Najbardziej ogólną formą zapisu tej relacji jest system informacyjny przyjmujący postać tabeli, w której kolumny odpowiadają uszkodzeniom, wiersze wartościom sygnałów diagnostycznych, a w poszczególnych polach podane są wartości sygnałów diagnostycznych, które przyjmują te sygnały w przypadku wystąpienia poszczególnych uszkodzeń. Dla każdego sygnału diagnostycznego może istnieć odmienny zbiór wartości V_j . Przykład systemu informacyjnego podano na rys.14.

S/F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	V_j
s_1	1	0	1	0	0	1	{0,1}
s_2	0	-1	0	+1	-1	0	{0,+1,-1}
s_3	-1	+1	+1,-1	0	+1	+1	{0,+1,-1}
s_4	0	1,2	0,1	0	1,2	1,2	{0,1,2}
s_5	+1	0	+1	+1	0	+1,-1	{0,+1,-1}

Rys. 14. Przykład systemu informacyjnego

Kolumna systemu informacyjnego określa sygnaturę uszkodzenia, tj. wartości sygnałów diagnostycznych odpowiadające danemu uszkodzeniu. Zakładamy, że sygnał diagnostyczny przyjmuje wartość zero jeśli nie jest wrażliwy na dane uszkodzenie. Inne wartości sygnałów świadczą o wystąpieniu uszkodzenia. Kolumny systemu informacyjnego określają reguły odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom o następującej postaci:

$$\text{Jeśli } (s_1 \in V_{k1}) \text{ i } \dots \text{ i } (s_j \in V_{kj}) \text{ i } \dots \text{ i } (s_l \in V_{kl}) \text{ to uszkodzenie } f_k. \quad (5)$$

Szczególnym przypadkiem systemu informacyjnego jest binarna macierz diagnostyczna, dla której wszystkie wartości sygnałów diagnostycznych przyjmują wartości 0 lub 1. Reguły odpowiadające kolumnom binarnej macierzy diagnostycznej mają postać:

$$\text{Jeśli } (s_1 = 0) \text{ i } \dots \text{ i } (s_j = 1) \text{ i } \dots \text{ i } (s_l = 1) \text{ to uszkodzenie } f_k. \quad (6)$$

5.2. Równoległe i szeregowe wnioskowanie diagnostyczne

Równoległe wnioskowanie diagnostyczne, prowadzone przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, polega na formułowaniu diagnozy w wyniku porównania uzyskanych sygnałów diagnostycznych z sygnaturami poszczególnych uszkodzeń [16,23].

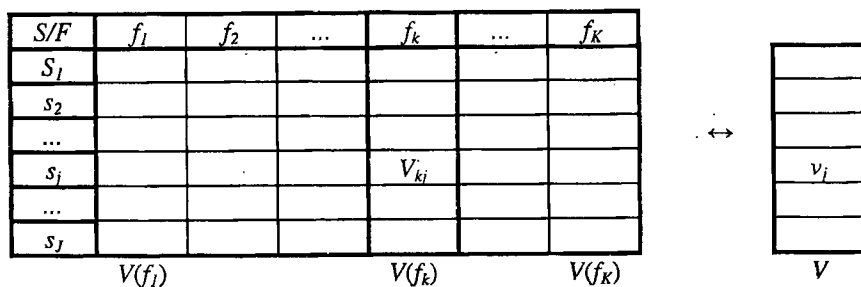
Lokalizacja uszkodzeń dokonywana jest przy użyciu zbioru sygnałów diagnostycznych S . Procedura wnioskowania polega na porównaniu uzyskanych wartości sygnałów diagnostycznych: $V = [v_1, v_2, \dots, v_j]^T$ z sygnaturą stanu zdatności oraz sygnaturami poszczególnych uszkodzeń. W przypadku, gdy występują symptomy uszkodzeń (wartości sygnałów diagnostycznych różne od 0), to diagnoza wskazuje podzbiór uszkodzeń, których sygnatury są zgodne z aktualnymi wartościami sygnałów diagnostycznych, co określa formuła:

$$DGN = \{f_k \in F : \forall_{s_j \in S} v_j \in V_{kj}\} \quad (7)$$

Zgodność oznacza, że wartość każdego sygnału diagnostycznego należy do podzbioru wartości wzorcowych $V_{jk} \equiv r(f_k, s_j)$ określonych w systemie informacyjnym.

Uszkodzenia wskazane w diagnozie są nierozróżnialne przy danym zbiorze sygnałów diagnostycznych. Zasadę równoległego wnioskowania diagnostycznego ilustruje rys.15.

sygnały aktualne



Rys 15. Równoległe wnioskowanie diagnostyczne - porównanie aktualnych sygnałów diagnostycznych V z sygnaturami uszkodzeń $V(f_k)$

Szeregowe wnioskowanie diagnostyczne polega na analizie wartości kolejnych sygnałów diagnostycznych i formułowaniu diagnozy w sposób krokowy, stopniowo zawężając zbiór możliwych uszkodzeń [16,18,23] Proces lokalizacji uszkodzeń rozpoczyna się po zaobserwowaniu pierwszego symptomu $s_x \neq 0$. Pierwsza diagnoza obejmuje wszystkie uszkodzenia wykrywane przez ten symptom:

$$DGN_1 = \{f_k \in F : s_x \in V_{kx}\} \quad (8)$$

Wartości poszczególnych sygnałów diagnostycznych analizowane są kolejno. W zależności od nich odpowiednio redukowane są zbiory możliwych uszkodzeń. Zerowa wartość sygnału diagnostycznego oznacza, że nie wystąpiło żadne z uszkodzeń wykrywanych przez ten sygnał. Inna niż 0 wartość sygnału diagnostycznego świadczy o wystąpieniu uszkodzenia lub podzbioru uszkodzeń ze zbioru $F(s_j)$, gdzie

$F(s_j) = \{f_k : V_{kj} \neq 0\}$ - zbiór uszkodzeń wykrywanych przez j -ty sygnał diagnostyczny.

Zerowa wartość sygnału diagnostycznego $s_j = 0$ powoduje zmniejszenie zbioru możliwych uszkodzeń o uszkodzenia wykrywane przez ten sygnał:

$$s_j = 0 \Rightarrow DGN_p = DGN_{p-1} - DGN_{p-1} \cap F(s_j), \quad (9)$$

gdzie: p - nr kroku wnioskowania.

Niezerowa wartość sygnału diagnostycznego $s_j \neq 0$ oznacza, że nowy zbiór możliwych uszkodzeń jest iloczynem poprzedniego zbioru możliwych uszkodzeń i zbioru uszkodzeń $F(s_j)$ wykrywanych przez dany sygnał s_j :

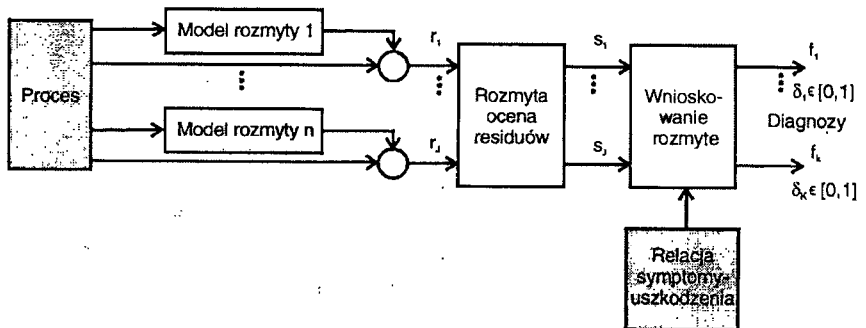
$$s_j \neq 0 \Rightarrow DGN_p = DGN_{p-1} \cap \{f_k \in F(s_j)\}. \quad (10)$$

Podstawową zaletą wnioskowania szeregowego jest możliwość podania aktualnej diagnozy w każdej chwili wnioskowania. Do uzyskania diagnozy ostatecznej nie jest zwykle potrzebna interpretacja wszystkich sygnałów diagnostycznych, dzięki czemu można uzyskać krótsze czasy wypracowania diagnozy niż w przypadku wnioskowania równoległego.

5.3. Zastosowanie logiki rozmytej do lokalizacji uszkodzeń

Przy diagnozowaniu procesów przemysłowych występuje wiele niepewności, które utrudniają wnioskowanie diagnostyczne [28]. Niepewne są symptomy uszkodzeń wykrywanych zarówno z zastosowaniem modeli jak też bez wykorzystania modeli. Trudności sprawia określenie wartości progowych, których przekroczenie świadczy o wystąpieniu uszkodzenia. Wiedza ekspertów o relacji między uszkodzeniami a zaobserwowanymi symptomami jest często niepewna. Wszystkie powyższe niepewności powinny być uwzględniane w procesie wnioskowania. Skutecznym sposobem przetwarzania informacji niepewnej i nieprecyzyjnej jest logika rozmyta. Dlatego z powodzeniem jest stosowana w algorytmach diagnozowania [8, 16,18,23,26,31,34].

Typowy system wnioskowania rozmytego zawiera trzy bloki: blok rozmywania (fuzyfikacji), blok wnioskowania (inferencji) oraz blok wyostrzania (defuzyfikacji) [8]. Zarówno sygnały wejściowe systemu jak też wyjściowe są sygnałami ostrymi. Tak jest w przypadku modelowania i sterowania rozmytego. W przypadku lokalizacji uszkodzeń struktura wnioskowania rozmytego jest prostsza. Zawiera ona jedynie dwa bloki: blok rozmywania oraz blok wnioskowania [16,23].



Rys. 16. Schemat diagnostowania z zastosowaniem logiki rozmytej

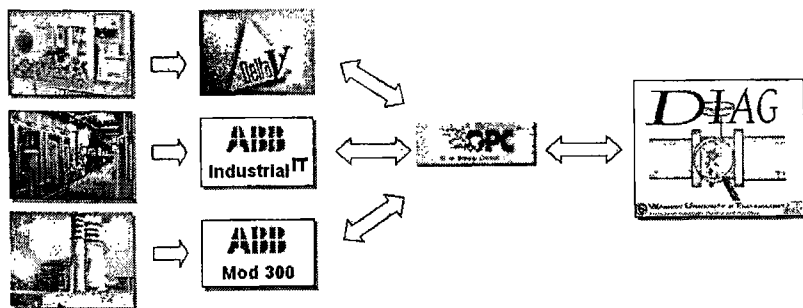
Sygnalami wejściowymi są ciągłe wartości residuów. Są one rozmywane w bloku fuzyfikacji. Wyjściami tego bloku są rozmyte sygnały diagnostyczne. Stanowią one wejścia bloku inferencji. Na wyjściu systemu są stany obiektu z poszczególnymi uszkodzeniami wraz z przyporządkowanymi im współczynnikami pewności istnienia. Struktura systemu diagnozowania, w której do detekcji i lokalizacji uszkodzeń zastosowano logikę rozmytą została przedstawiona na rys.16.

Wiedza o relacji uszkodzenia symptomy przyjmuje postać reguł (5) lub (6). Reguły te mogą być bezpośrednio określone przez eksperta lub wyprowadzone z binarnej macierzy diagnostycznej lub systemu informacyjnego. Wypracowywane diagnozy (rys.17) wskazują uszkodzenia f_k oraz współczynniki pewności ich wystąpienia δ_k .

6. SYSTEMY BIEŻĄCEJ DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

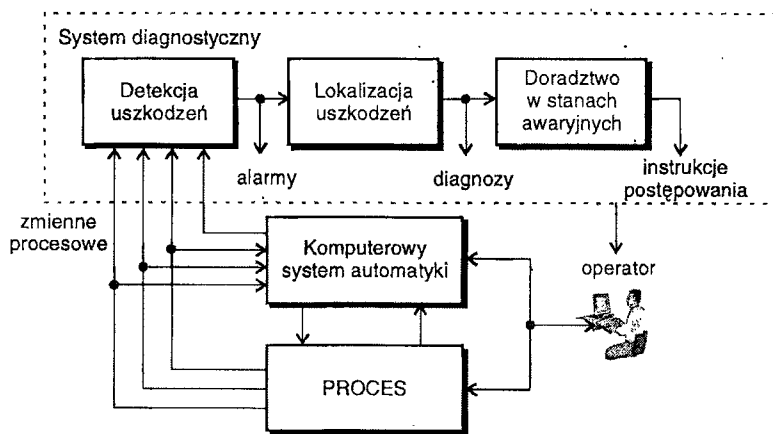
W następstwie rozwoju metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń zaczęły powstawać systemy diagnostyczne dla procesów przemysłowych [16,23]. Obecnie wiele ośrodków badawczych a także firmy dominujące na rynku automatyki prowadzą prace nad oprogramowaniem do diagnostyki procesów. W Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej (PW) zrealizowano system DIAG czasu rzeczywistego przeznaczony do diagnostyki procesów przemysłowych. Był on efektem wielu prac, dotyczących metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń oraz oprogramowania diagnostycznego, prowadzonych m.in. w ramach grantów Unii Europejskiej (IQ2FD, DAMADICS, CHEM), grantów KBN oraz projektów priorytetowych PW (w Centrum Automatyki i Technik Informacyjno-Decyzyjnych PW). Poniżej krótko omówiono funkcje systemu DIAG.

Zadaniem systemu DIAG jest wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń komponentów instalacji technologicznej, urządzeń wykonawczych i pomiarowych w trakcie funkcjonowania procesu. Obiektem diagnozowania mogą być instalacje technologiczne w przemyśle chemicznym, energetycznym, ciepłowniczym, spożywczym i w wielu innych. DIAG jest dostosowany do współpracy z różnymi zdecentralizowanymi systemami automatyki (DCS), jak również systemami nadzorowania i monitorowania procesów (SCADA). Dane pomiarowe do systemu diagnostycznego doprowadzane są na drodze transmisji cyfrowej pomiędzy systemem automatyki a systemem diagnostycznym z wykorzystaniem standardu OPC (rys.17).



Rys. 17. Współpraca systemu DIAG z systemami DCS

Ogólna struktura funkcjonalna systemu została przedstawiona na rys.18. Podstawowymi funkcjami systemu DIAG jest detekcja i lokalizacja uszkodzeń. W fazie detekcji, w wyniku przetwarzania zmiennych procesowych, wykrywane są symptomy uszkodzeń. W systemie DIAG stosowane są różne metody detekcji uszkodzeń: metody bazujące na modelach rozmytych i neuronowych, metody wykorzystujące równania fizyczne, np. równania bilansowe, metody wykorzystujące liniowe modele obiektów oraz metody heurystyczne bazujące na relacjach pomiędzy zmiennymi procesowymi. Wybór stosowanych metod detekcji zależy od wiedzy posiadanej o obiekcie diagnozowania. W systemie istnieje moduł tworzenia modeli rozmytych i neuronowych wyodrębnionych części instalacji technologicznej. Modele takie strojone są na podstawie danych pomiarowych rejestrowanych w trakcie eksploatacji obiektu. Zbiór algorytmów detekcyjnych projektowany jest indywidualnie dla każdej instalacji. Nie wymaga to jednak realizacji specjalistycznego oprogramowania. Jest ono w pełni konfigurowalne.



Rys.18. Ogólna struktura systemu DIAG

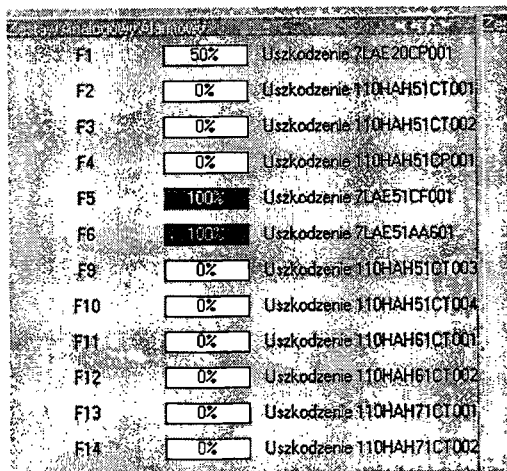
Na podstawie zbioru bieżących wartości sygnałów diagnostycznych oraz zapisanej w bazie wiedzy relacji między uszkodzeniami oraz wartościami sygnałów diagnostycznych prowadzona jest lokalizacja uszkodzeń. Do lokalizacji uszkodzeń zastosowano metodę F-DTS [16,23] opracowaną w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Wykorzystuje ona logikę rozmytą do oceny wartości residuów oraz wnioskowania diagnostycznego. Generowane diagnozy wskazują uszkodzenia oraz współczynniki pewności ich wystąpienia (rys.5).

Stosowane metody detekcji i lokalizacji błędów zapewniają możliwość ciągłej rozbudowy systemu DIAG wraz z poszerzaniem się wiedzy na temat procesu. System DIAG charakteryzuje się również odpornością na zmiany zachodzące w zbiorze dostępnych sygnałów pomiarowych. Zmiany takie mogą wynikać z wcześniejszych uszkodzeń lub celowych wyłączeń urządzeń przez operatora. Stosownie do tych zmian, system DIAG dokonuje odpowiednich modyfikacji w zbiorze aktywnych algorytmów detekcyjnych. Może to mieć wpływ na osiąganą dokładność diagnoz, lecz eliminuje możliwość popełnienia błędu podczas wnioskowania.

Podstawową formą wizualizacji jest prezentacja uszkodzeń na schematach synoptycznych procesu oraz w oknie generowanych diagnoz. Ponadto wyświetlane są

przebiegi zmiennych procesowych i residuów oraz bargrafy wskaźników pewności istnienia poszczególnych uszkodzeń (rys.19). Jeśli wartość wskaźnika jest bardzo wysoka, to słupek ilustrujący tę wartość ma kolor czerwony. Przy niższych wartościach przyjmuje on kolor żółty, a przy wartościach bliskich zera ma kolor biały. Ponadto system DIAG może realizować dodatkowe zadania: przygotowywanie raportów diagnostycznych, uzasadnienie diagnoz, archiwizację diagnoz oraz wspomaganie decyzji zabezpieczających.

Aktualnie prowadzone są prace nad wdrożeniem systemu DIAG do diagnostyki instalacji IDR w zakładzie mocznika w Zakładach Azotowych Puławy oraz diagnostyki stacji wyparnej w Cukrowni Lublin.



Rys. 19. Wizualizacja uszkodzeń w systemie DIAG

7. PODSUMOWANIE

Niedoskonałość systemów alarmowych oraz potrzeba wczesnego i dokładnego rozpoznawania stanów nieprawidłowych i awaryjnych powoduje intensywny rozwój systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych. Dokładne i szybko uzyskane diagnozy stwarzają możliwość przeprowadzenia niezbędnych akcji zabezpieczających. Systemy diagnostyczne stanowią zatem wraz z działaniami zabezpieczającymi drugi, wyższy poziom systemu zabezpieczeń procesu, podczas gdy klasyczne układy blokad technologicznych i standardowych układów zabezpieczeń stanowią pierwszy, niższy poziom systemu zabezpieczeń procesu. Wyższa warstwa zabezpieczeń procesu, dzięki dokładnej i szybko osiąganym informacji diagnostycznej, daje możliwość redukcji lub eliminacji konsekwencji uszkodzeń. Umożliwia to uniknięcie zadziałania niższego poziomu zabezpieczeń, co w wielu przypadkach jest przyczyną zatrzymania przebiegu procesu lub niepotrzebnego ograniczenia jego wydajności.

Efektym wdrażania systemów bieżącej diagnostyki, wspomagających operatorów procesu jest: zwiększenie bezpieczeństwa przebiegu procesu, ograniczenie zagrożeń dla środowiska, redukcja strat ekonomicznych powodowanych uszkodzeniami oraz eliminacja przeciążenia operatorów procesu natłokiem informacji alarmowej.

LITERATURA

1. Ayoubi M. (1994). *Fault diagnosis with dynamic neural structures and application to a turbocharger*. IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 94, Espoo, Vol.2, 618-623.
2. Basseville M., Nikiforov I.V. (1993). *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
3. Chen J., Patton R.J. (1999). *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
4. Chow E.Y., Willsky A.S. (1984). *Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems*. IEEE Trans. Aut. Contr., Vol. 29(3), 603-614.
5. Clark R.N. (1979). *The dedicated observer approach to instrument failure detection*. Proc. 18th IEEE CDC. Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
6. Frank P.M. (1987). *Fault diagnosis in dynamic systems via state estimations methods - a survey*. In S.G. Tzafestas et al. (Eds). *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, Vol. 2. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / Lancaster / Tokyo.
7. Frank P.M. (1990). *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy*. Automatica 26, 459-474.
8. Frank P.M. (1994). *Fuzzy supervision. Application of fuzzy logic to process supervision and fault diagnosis*. Int. Workshop Fuzzy Technologies in Automation and Intelligent Systems. Fuzzy Duisburg'94, Duisburg, Germany, April 7-8, 36-59.
9. Gertler J. (1991). *Analytical redundancy methods in fault detection and isolation*. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes - SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, Vol. 1, 9-21.
10. Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
11. Goedecke W. (1986). *Fehlererkennung an einem thermischen Prozeß mit Methoden der Parameterschätzung*. Dissertation TH Darmstadt. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Bd. 130 Düsseldorf: VDI-Verlag.
12. Isermann R. (1984). *Process fault detection based on modeling and estimation. Methods - a survey*. Automatica, 20(4), 387-404.
13. Koivo H.N. (1994). *Artificial neural networks in fault diagnosis and control*. Control Eng. Practice, Vol. 2, No. 7, 89-101.
14. Korbicz J. (1998). *Sztuczne sieci neuronowe i ich zastosowanie w diagnostyce procesów przemysłowych*. Pomiar-Automatyka-Kontrola, 4, 129-133.
15. Korbicz J., Patan K., Obuchowicz A. (1999). *Dynamic neural Networks for process modelling in fault detection and isolation systems*. Int. Jour. of Applied Mathematics and Computer Science. Vol.9. No 3. 519-546.
16. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (2002). *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. WNT, Warszawa
17. Kościelny J.M., Pieniążek A. (1994). *Algorithm of Fault Detection and Isolation Applied for Evaporation Unit in Sugar Factory*. Control Engineering Practice, Vol.2, No.4, 649-657.
18. Kościelny J.M. (1995). *Fault Isolation in Industrial Processes by Dynamic Table of States Method*. Automatica, Vol.31, No.5, 747-753.

19. Kościelny J.M. (1999). *Application of Fuzzy Logic Fault Isolation in a Three-Tank System*. 14th World Congress IFAC, Beijing, Chiny, P-7e-05-1, 73-78.
20. Kościelny J.M., Sędziak D., Zakroczyński K. (1999). *Fuzzy Logic Fault Isolation in Large Scale Systems*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol.9, No.3, 637-652.
21. Kościelny J.M., Jankowska A., Syfert M., Ostasz A., Nowak J. (1999). *Metody detekcji uszkodzeń bazujące na modelach rozmytych i neuronowych - badania dla wybranych obiektów przemysłowych*. IV Krajowa Konferencja N-T „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”, Kazimierz Dolny, 49-64.
22. Kościelny J.M., Syfert M. (2000). *Current Diagnostics of Power Boiler System with Use of Fuzzy Logic*. 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process – SAFEPROCESS'2000, Budapest, Hungary, June 14-16, Vol.2, 681-686.
23. Kościelny J.M. (2001). *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
24. Köppen-Seliger B., Frank P.M. (1995). Residual evaluation for fault detection and isolation with RCE neural networks. American Control Conference, Seattle, USA, 3264-3268.
25. Kramer M.A., Leonard J.A. (1990). *Diagnosis using backpropagation neural networks. Analysis and criticism*. Computers chem. Engng., Vol. 14, No. 12, 1323-1338.
26. Leonhardt S., Ayoubi M. (1997). *Methods of fault diagnosis*. Control Eng. Practice. Vol.5, No.5, 683-692.
27. Niederliński A. (1977). *Systemy cyfrowe automatyki przemysłowej. Zastosowania*. WNT, Warszawa.
28. Pattan K., Obuchowicz A. (1999). *System diagnostyczny dla zespołu dwóch zbiorników z opóźnieniem oparty na technikach neuronowych*. IV Konferencja Diagnostyka Procesów Przemysłowych. Kazimierz Dolny, 133-138.
29. Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.) (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer.
30. Pawlak Z. (1983). *Systemy informacyjne. Podstawy teoretyczne*. WNT, Warszawa.
31. Sędziak D. (2001). *Metoda identyfikacji uszkodzeń w procesach przemysłowych*. Rozprawa doktorska, Wydział Mechatroniki PW.
32. Sorsa T., Koivo H.N. (1993). *Application of artificial neural networks in process fault diagnosis*. Automatica, 1993, Vol.29, No 4, 843-849
33. Syfert M., Kościelny J.M. (2001). *Fuzzy Neural Network Based Diagnostic System. Application for Three-Tank System*. European Control Conference 2001, 1631-1636.
34. Syfert M. (2003). *Diagnostyka procesów przemysłowych z wykorzystaniem modeli lokalnych i logiki rozmytej*. Rozprawa doktorska, Wydział Mechatroniki PW.