

prof. dr hab. inż. Jan Maciej Kościelny
 Politechnika Warszawska
 Wydział Mechatroniki
 Instytut Automatyki i Robotyki

PRAKTYCZNE PROBLEMY DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Przedstawiono zadania systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych w zestawieniu z niedostatkami współczesnych systemów alarmowych. Omówiono uwarunkowania i ograniczenia występujące w diagnostyce systemów dużej skali oraz sformułowano wymagania dla systemów diagnostycznych. Podano procedurę doboru algorytmów detekcyjnych umożliwiającą uzyskanie wymaganej wykrywalności i rozróżnialności uszkodzeń. Scharakteryzowano główne problemy, które mogą być przyczyną powstawania fałszywych diagnoz. Należą do nich: błędne wyniki realizowanych testów, zmienność struktury diagnozowanego procesu, opóźnienia powstawania symptomów, uszkodzenia wielokrotne oraz możliwość wystąpienia uszkodzeń nieuwzględnionych na etapie projektowania systemu. Podano metody rozwiązania lub ograniczenia tych problemów, zapewniające podwyższenie odporności systemu diagnostycznego. Metody te zostały zastosowane w systemach AMANDD oraz DIASTER, które krótko omówiono w końcowej części pracy.

THE PRACTICAL PROBLEMS OF THE DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL PROCESSES

The main tasks of the diagnostic systems intended for industrial processes have been presented in this paper, particularly in the context of relative privation of contemporary alarm systems. Boundary conditions of the diagnostics of the large scale systems as well as the main requirements for the diagnostics systems have been formulated and discussed. The procedure of the selection of diagnostic algorithms making allowance for the achievement of the demanded fault detectability and distinguishability has been given. Main problems suspected to be responsible for the generation of false diagnoses have been pointed out. To these problems belong: false results of diagnostics tests, dynamic changes in the structure of diagnosed system, latency in generation, of symptoms, appearance of multiple faults and possibility of appearance of faults that have been not considered in the diagnostic system development phase. The methods of the solution or limitation of these problems have been given. This makes possible to enhance robustness of the diagnostic system. Methods described in this paper have been implemented in the AMandD and DiaSter systems. Both systems have been briefly described in the final part of this paper.

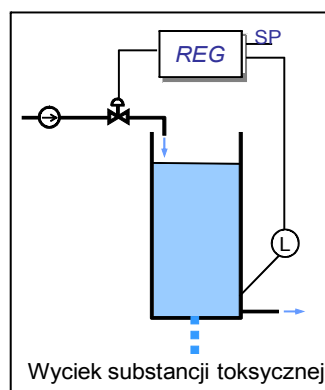
1. WSTĘP

W instalacjach technologicznych w przemyśle energetycznym, chemicznym, hutniczym, spożywczym i wielu innych pomimo stosowania elementów o dużej niezawodności nieuchronne są jednak uszkodzenia komponentów instalacji technologicznej, urządzeń pomiarowych i wykonawczych. 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.

W systemach automatyki procesów przemysłowych 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, takich jak [23]:

- duża liczba alarmów sygnalizowanych w krótkim przedziale czasu w przypadku powstania groźnych uszkodzeń, powodująca zjawisko przeciążenia informacyjnego operatorów
- brak możliwości detekcji niektórych uszkodzeń ze względu na maskowanie symptomów przez układy regulacji (rys. 1)
- duże opóźnienia detekcji
- brak mechanizmów wnioskowania umożliwiających formułowania diagnoz o uszkodzeniach.



Rys. 1. Maskowanie objawów wycieku toksycznej substancji przez układ regulacji poziomu
 Powyższe niedogodności utrudniają operatorom wypracowanie diagnozy, tj. rozpoznania 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 diagnostyki procesów przemysłowych jest wczesne wykrywanie i dokładne rozpoznawanie (rozdzielanie) powstających uszkodzeń, rozumianych jako wszelkiego rodzaju zdarzenia wpływające destrukcyjnie na przebieg procesu. Podstawowymi fazami działań diagnostycznych jest detekcja i lokalizacja uszkodzeń. W fazie detekcji na podstawie sygnałów sterujących i mierzonych, z wykorzystaniem modeli obiektu lub bez zastosowania modeli, wyliczane są wartości sygnałów diagnostycznych, które niosą informacje o stanie obiektu. Symptomatic uszkodzenia jest wystąpienie takiej wartości sygnału diagnostycznego, która świadczy o powstaniu uszkodzenia w kontrolowanej części obiektu. W fazie lokalizacji na podstawie bieżących wartości sygnałów diagnostycznych oraz znajomości związku między uszkodzeniami i wartościami sygnałów diagnostycznych wypracowywane są diagnozy. Wskazują one zaistniałe uszkodzenia.

W okresie ostatnich dwudziestu lat nastąpił burzliwy rozwój metod diagnostyki uszkodzeń, wywodzących się z teorii modelowania i identyfikacji oraz technik sztucznej inteligencji. Najszerszy opis tych metod znaleźć można w opracowaniach książkowych [1, 2, 4, 9, 10, 11, 13, 16, 31, 36], artykułach przeglądowych [3, 6, 7, 8, 12, 30, 31] oraz materiałach IFAC

Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes – SAFEPROCESS, organizowanego cyklicznie co 3 lata, począwszy od 1991 r. Polskim odpowiednikiem symposium SAFEPROCESS jest konferencja Diagnostyka Procesów i Systemów, organizowana już dziewięciokrotnie, początkowo pod nazwą Diagnostyka Procesów Przemysłowych.

2. UWARUNKOWANIA I OGRANICZENIA W DIAGNOSTYCE PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Zadaniem systemów diagnostycznych jest wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń oraz wspomaganie operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych. Realizacja powyższych zadań jest bardzo trudna ze względu na złożoność diagnozowanych instalacji, zawierających setki, a nawet tysiące urządzeń pracujących zwykle w trudnych i zmiennych warunkach oraz wynikającą z tego dużą liczbę i różnorodność możliwych uszkodzeń. Istnieje wiele uwarunkowań i ograniczeń, które trzeba uwzględniać przy projektowaniu systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych. Do najważniejszych należą:

- **Brak możliwości zakłócania procesu wymuszeniami testowymi.** Diagnostyka musi być realizowana na bieżąco, z wykorzystaniem wyłącznie danych roboczych.
- **Struktura procesu ulega często zmianom,** związanym z włączeniami i wyłączeniami aparatów technologicznych, odłączeniami urządzeń pomiarowych w celu ich obsługi itp. Ta zmienność struktury stanowi bardzo istotne utrudnienie przy projektowaniu systemu diagnostycznego.
- **Brak danych pomiarowych dla stanów awaryjnych.** W bazach danych systemów automatyki (DCS i SCADA) dostępne są duże zbiory danych pomiarowych, ale zarchiwizowane przebiegi dotyczą stanów normalnej pracy obiektu oraz nielicznych zarejestrowanych stanów nienormalnych i awaryjnych. To ogranicza możliwość zastosowania metod klasyfikacji do lokalizacji uszkodzeń. Wymagają one pozyskania w fazie uczenia wiedzy o związkach między wartościami symptomów a uszkodzeniami. Do uczenia niezbędne są dane pomiarowe charakteryzujące wszystkie stany obiektu, które powinny być rozpoznawane, a zatem stan normalny obiektu oraz stany z uszkodzeniami. Pozyskanie takich danych z eksploatacji obiektu jest niemożliwe. Ponadto instalacje technologiczne w przemyśle chemicznym, energetycznym, spożywczym itp. są najczęściej rozwiązaniami jednostkowymi lub realizowanymi w krótkich seriach, nie ma zatem możliwości wykorzystania wiedzy z obiektów tego samego typu. System diagnostyczny powinien natomiast wykrywać i rozpoznawać groźne awarie, które nigdy wcześniej nie wystąpiły.
- **Brak możliwości pozyskania opisu matematycznego obiektu uwzględniającego wpływ uszkodzeń.** Modelowanie obiektów z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń jest bardzo trudne i kosztowne nawet dla prostych obiektów, natomiast dla złożonych instalacji technologicznych wręcz niemożliwe. Dlatego w diagnostyce takich obiektów praktycznie nie znajdują zastosowania dobrze ugruntowane teoretycznie metody rozpoznawania uszkodzeń wykorzystujące taki opis (residua strukturalne, kierunkowe, obserwatory nieznanego wejścia itp.)

W diagnostyce złożonych instalacji technologicznych największe znaczenie mają metody wykorzystujące wiedzę ekspercką do zaprojektowania relacji uszkodzenia - symptomy. Dobra znajomość funkcjonowania obiektu umożliwia określenie tej zależności w sposób stosunkowo prosty. Projektant systemu diagnostycznego może dodatkowo wykorzystać wiedzę technologów, operatorów procesu lub służb utrzymania ruchu.

- **Trudności pozyskania modeli obiektu opisujących zjawiska fizyczne.** Do detekcji uszkodzeń stosowane są różnego rodzaju modele opisujące funkcjonowanie obiektu w stanie normalnym. Najpełniejszy model obiektu uzyskać można bezpośrednio z równań fizycznych, np. równań bilansowych. Model taki odzwierciedla własności obiektu w całym zakresie pracy. Jednak opracowanie modeli bazujących na opisie zjawisk fizycznych jest dla wielu obiektów bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Stosowane są zatem modele aproksymacyjne, które z odpowiednią dokładnością odwzorowują tylko wybrane cechy funkcjonalne rzeczywistego obiektu. Natura niektórych zjawisk występujących w procesach przemysłowych nie jest do końca znana, co uniemożliwia budowę modeli analitycznych. W takim przypadku wykorzystywane mogą być jedynie modele tworzone na podstawie danych pomiarowych. Zakres użyteczności tego typu modeli ogranicza się do zakresu zmienności sygnałów wejściowych i wyjściowych, na podstawie których model był uczony.
- **Niepewności symptomów.** W praktyce niemal wyłącznie mamy do czynienia z sygnałami niepewnymi [8, 11, 16, 19]. Pomiary wartości wielkości procesowych obciążone są zakłóceniami i szumem pomiarowym. Niepewne są także modele procesu i relacje uszkodzenia-symptomy definiowane na podstawie wiedzy eksperckiej. W rezultacie symptomy wykrywane na podstawie modeli z wykorzystaniem danych pomiarowych są także niepewne. Konieczne jest zatem zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania informacji niepewnych.
- **Niejednorodność wiedzy o diagnozowanym procesie.** Dla pewnych części obiektu mogą być znane modele analityczne, dla innych istnieje możliwość pozyskania modeli neuronowych lub rozmytych na podstawie danych pomiarowych, natomiast dla słabo opomiarowanych części obiektu do detekcji uszkodzeń wykorzystane mogą być tylko proste związki heurystyczne [16]. Z tego względu systemy diagnostyczne powinny posiadać zdolność integracji różnorodnych metod detekcji uszkodzeń. Ponadto w czasie eksploatacji systemu wzrasta poziom wiedzy o diagnozowanym systemie. Wiedza ta może być z powodzeniem spożytkowana np. w celu uzyskania bardziej precyzyjnych diagnoz. Systemy diagnostyki przemysłowej powinny mieć na tyle elastyczną strukturę, aby umożliwiać wykorzystanie tej dodatkowej wiedzy.

3. WYMAGANIA STAWIANE SYSTEMOM DIAGNOSTYCZNYM

Podstawowymi wymaganiami stawianymi systemom diagnostycznym jest wykrywalność i rozróżnialność uszkodzeń. Najprostszym wskaźnikiem wykrywalności uszkodzeń jest stosunek liczby uszkodzeń wykrywanych przez system diagnostyczny do liczby wszystkich uszkodzeń możliwych do wystąpienia w obiekcie. Powszechnie wymaga się, aby wszystkie uszkodzenia były wykrywalne, zatem wartość tego wskaźnika powinna wynosić 1.

Rozróżnialność uszkodzeń uzyskujemy wtedy, gdy sygnatury poszczególnych uszkodzeń są różne [11, 16]. Oznacza to, że każde z uszkodzeń powoduje wystąpienie innego podzbioru wartości sygnałów diagnostycznych niż pozostałe. Im większa rozróżnialność uszkodzeń, tym większa dokładność diagnoz, określana jako odwrotność średniej liczby uszkodzeń wskazywanych w diagnozach [16].

Wymagany stopień wykrywalności i rozróżnialności uszkodzeń należy zapewnić na etapie projektowania systemu diagnostycznego, przez odpowiedni dobór zbioru testów. Natomiast system diagnostyczny powinien gwarantować odporność diagnozowania.

Pojawia się pytanie: jaki system diagnostyczny możemy nazwać odpornym? Aby odpowiedzieć na sformułowane pytanie należy określić przyczyny, które mogą prowadzić do generowania fałszywych diagnoz. Przyczyn tych jest wiele. W przypadku diagnostyki procesów przemysłowych należą do nich [25]:

- fałszywe wyniki sprawdzeń (testów) diagnostycznych
- zmiany zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych
- zmiany możliwych do wykorzystania algorytmów detekcyjnych (testów)
- zmiany zbioru urządzeń diagnozowanych, a tym samym zbioru rozpatrywanych uszkodzeń
- opóźnienia powstawania symptomów
- niepewności symptomów i możliwość pojawiania się nieznanymi stanów systemu (np. uszkodzeń pominiętych na etapie projektowania systemu).

Odporny system diagnostyczny charakteryzuje się zatem zdolnością formułowania prawdziwych diagnoz, pomimo występowania wymienionych powyżej przyczyn, zakłócających proces wnioskowania diagnostycznego.

Poniżej scharakteryzowano wymienione problemy oraz krótko omówiono metody ich rozwiązania.

4. JAK ZAPEWNIĆ WYMAGANĄ WYKRYWALNOŚĆ I ROZRÓŻNIALNOŚĆ USZKODZEŃ?

Zbiór algorytmów detekcyjnych jest dobierany na etapie projektowania aplikacji w taki sposób, aby oraz zapewniał wykrywalność wszystkich uszkodzeń oraz możliwie dużą rozróżnialność uszkodzeń. Uszkodzenie jest wykrywalne, jeśli istnieje przynajmniej jedno sprawdzenie, które jest wrażliwe na to uszkodzenie.

Uzyskanie rozróżnialności wszystkich uszkodzeń obiektu zwykle nie jest możliwe. Rozróżnialność uszkodzeń zależy przede wszystkim od opomiarowania diagnozowanego obiektu. Im więcej wielkości jest mierzonych, tym więcej jest możliwych do realizacji algorytmów detekcyjnych i dzięki temu uzyskujemy większą rozróżnialność uszkodzeń oraz dokładniejsze diagnozy. Przy projektowaniu diagnostyki procesów przemysłowych wykorzystywany jest zbiór pomiarów już istniejących. Rzadko można wprowadzić dodatkowe pomiary. Wynika to z technicznych trudności instalacji nowych przetworników pomiarowych w funkcjonującej instalacji technologicznej oraz dodatkowych kosztów.

Zwiększenie rozróżnialności przy określonym zbiorze pomiarów możemy uzyskać trzema metodami:

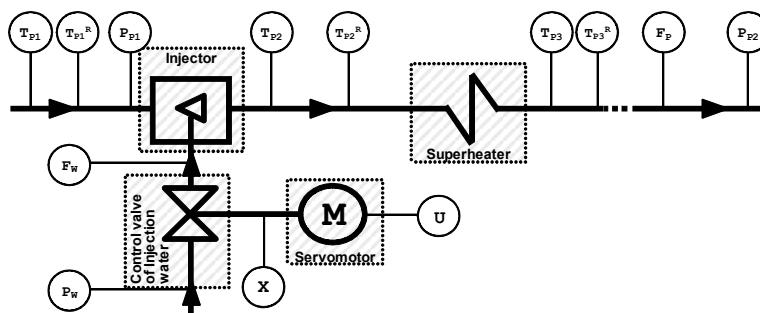
- przez strukturyzację residuów, tj. projektowanie dodatkowych residuów wtórnych [9, 16, 31]
- przez stosowanie wielowartościowej oceny residuów, co w praktyce sprowadza się do oceny trójwartościowej, uwzględniającej znak residuum [16]
- przez wykorzystanie wiedzy dotyczącej kolejności powstawania symptomów [16, 23, 35].

W p. 2 założono brak możliwości pozyskania równań residuów w postaci wewnętrznej (uwzględniającej ich zależność od uszkodzeń). Dostępna jest zatem tylko postać obliczeniowa residuum, tj. zależność residuum od zmiennych procesowych, przy czym nie zawsze ma ona formę analityczną. Często zależność ta jest określona z zastosowaniem modelu neuronowego lub rozmytego. Dlatego metody projektowania residuów wtórnych, stosowane dla modeli liniowych [9, 11, 31] nie nadają się do projektowania strukturalnego zbioru residuów gene-

rowanych na podstawie nieliniowych modeli analitycznych, a także modeli neuronowych i rozmytych.

Do zaprojektowania strukturalnego zbioru residuów stosowana jest następująca procedura postępowania [13, 16]:

- Projektowane są modele cząstkowe (analityczne, neuronowe lub rozmyte) dla możliwie najmniejszych części obiektu z wykorzystaniem dostępnych sygnałów pomiarowych. Ilustruje to rys. 2. Aby dany model mógł być utworzony musi istnieć zbiór pomiarów wystarczający do zamodelowania z określoną dokładnością własności statycznych i dynamicznych danego podobiektu. Zbiór modeli cząstkowych powinien pokrywać cały obiekt. Każdy model cząstkowy jest podstawą algorytmu detekcyjnego.
- Dla każdego algorytmu detekcyjnego określany jest zbiór wykrywanych uszkodzeń $F(s_j)$. Wykorzystywana jest do tego wiedza ekspercka o wpływie uszkodzeń na residua.
- Jeśli modele cząstkowe pewnych części obiektu nie mogą być uzyskane, to należy rozważyć możliwość wprowadzenia dodatkowych sygnałów pomiarowych. Jeśli nie jest to możliwe ze względów technicznych lub ekonomicznych, to należy zaprojektować testy wykorzystujące wiedzę heurystyczną o obiekcie.
- Analizowana jest uzyskiwana wykrywalność i rozróżnialność uszkodzeń. Jeśli nie jest ona wystarczająca, to dodatkowe testy są projektowane na zasadzie łączenia modeli cząstkowych dla sąsiadujących części obiektu. Przykładowo łącząc model serwowatora i zaworu regulacyjnego (rys. 2) uzyskujemy nowy model, dla którego generowane będzie residuum wtórne $r_{w1} = F_w - f(U, P_w, P_{p1})$. Jest ono niewrażliwe na uszkodzenie sygnału położenia tłoczyska siłownika X , na które wrażliwe są oba residua pierwotne: $r_1 = X - f(U)$, $r_2 = F_w - f(X, P_w, P_{p1})$.
- Procedura taka jest prowadzona ewentualnie dalej, przy czym kolejne modele wykorzystywane w algorytmach testów obejmują coraz to większe części obiektu.



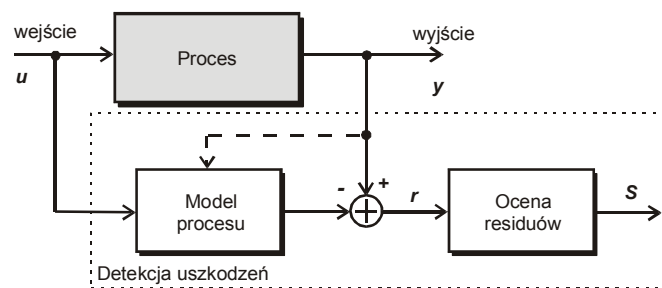
Rys. 2. Modele cząstkowe dla fragmentu ciągu parowego bloku energetycznego

Przedstawiona procedura projektowania zbioru algorytmów detekcyjnych ma charakter iteracyjny. W trakcie projektowania tworzona jest również binarna macierz diagnostyczna [9, 10, 11, 16]. Określają ją podzbiory uszkodzeń $F(s_j)$ wykrywanych przez poszczególne algorytmy detekcyjne. W przypadku stosowania trójwartościowej oceny residuów zamiast binarnej macierzy tworzony jest system informacyjny *FIS* – *Fault Isolation System* [11, 13, 15, 16, 21]. Po zaprojektowaniu pierwotnego zbioru algorytmów detekcyjnych przeprowadza się analizę uzyskiwanej wykrywalności i rozróżnialności uszkodzeń oraz wprowadza nowe residua, zwiększające stopień wykrywalności lub rozróżnialności uszkodzeń. Proces ten powtarza się wielokrotnie, aż do osiągnięcia wymaganych właściwości.

5. WCZESNE WYKRYWANIE USZKODZEŃ A MOŻLIWOŚĆ FALSZYWYCH SYMPTOMÓW

5.1. Charakterystyka problemu

Wyróżnić można dwie zasadnicze grupy metod detekcji uszkodzeń: (model based) z zastosowaniem różnego rodzaju modeli cząstkowych obiektu diagnozowanego (rys. 3.) oraz (*signal based*) na podstawie analizy sygnałów, bez wykorzystania modeli. W obu przypadkach decyzja o wykryciu uszkodzenia podejmowana jest w wyniku oceny wartości residuum lub innego sygnału z przyjętymi ograniczeniami. Jeśli dopuszczalny zakres zmienności tych sygnałów, charakteryzujący stan normalny obiektu, będzie wąski, to uzyskamy krótkie czasy detekcji uszkodzeń, ale prawdopodobieństwo powstawania fałszywych symptomów będzie wysokie. Jeśli ten zakres będzie szeroki, to czas detekcji ulegnie wydłużeniu, ale redukcji ulegnie liczba fałszywych symptomów. Mogą wystąpić także błędy detekcji związane z niewykryciem symptomu przy małych rozmiarach uszkodzeń. Błędy detekcji uszkodzeń są związane z niepewnymi pomiarami, zakłóceniami i szumami pomiarowymi oraz niedokładnością modeli stosowanych do detekcji uszkodzeń.

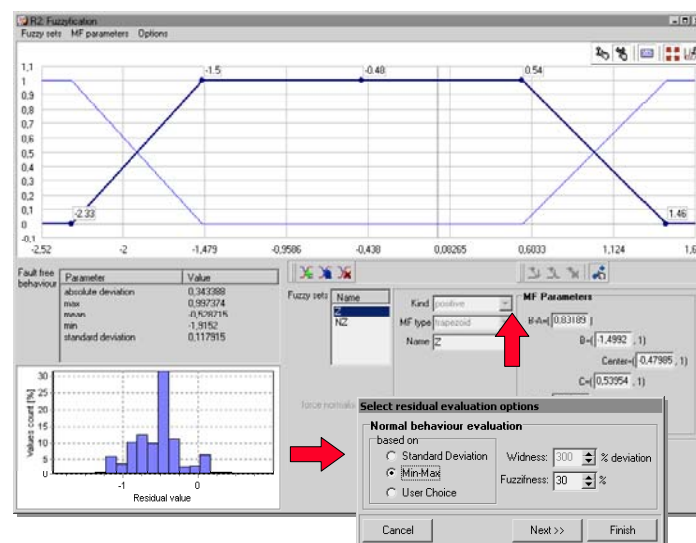


Rys. 3. Detekcja uszkodzeń z zastosowaniem modelu procesu

5.2. Metody redukcji błędów detekcji uszkodzeń.

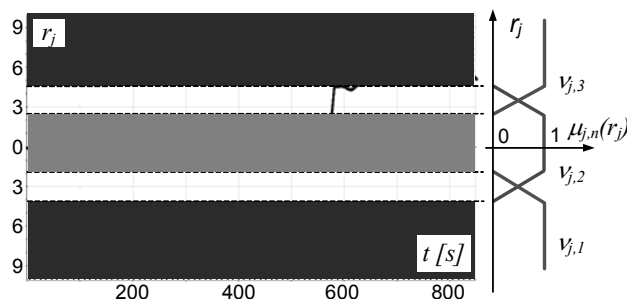
Redukcję błędów detekcji uszkodzeń uzyskuje się przez:

- Wykrywanie przekroczeń granic dopuszczalnych nie na podstawie chwilowej wartości residuum (lub innego sygnału) lecz wartości średniej w przesuwym oknie zawierającym N ostatnich wartości.



Rys. 4. Automatyczne wyznaczanie wartości rozmytych ograniczeń w systemie DiaSter

- Uzależnienie ograniczeń od danych statystycznych charakteryzujących przebieg residuum (innego sygnału) w stanie normalnym procesu. Granice mogą być ustalane automatycznie przez system diagnostyczny (rys. 4).
- Zastosowanie rozmytej oceny wartości ocenianych sygnałów. Skutecznym sposobem uwzględnienia niepewności związanych z wyliczaniem residuami jest zastosowanie logiki rozmytej. Przykład rozmytej trójwartościowej oceny residuów ilustruje rys. 5.



Rys. 5. Rozmyta trójwartościowa ocena residuów

- Projektowanie odpornych algorytmów detekcyjnych. Wymagają one estymacji niepewności modelu wykorzystywanego do detekcji uszkodzeń. Zapewnienie odporności osiągnięte jest dwiema metodami: przez identyfikację przy ograniczonej wartości błędu lub przez statystyczne wyznaczanie obwiedni niepewności – adaptacyjnych progów [12, 13, 36].

6. PROBLEM ZMIENNOŚCI STRUKTURY OBIEKTU

6.1. Charakterystyka problemu

W fazie projektowania systemu diagnostycznego określone są zbiory: \bar{X} – zmiennych procesowych (sygnałów mierzonych Y i sterujących U) wykorzystywanych w algorytmach detekcyjnych, \bar{S} – sygnałów diagnostycznych generowanych na wyjściach sprawdzeń oraz \bar{F} – uszkodzeń. Związek między sygnałami diagnostycznymi, a wykorzystywanymi do ich wyliczenia zmiennymi procesowymi określa relacja \bar{R}_{XS} , natomiast relacja \bar{R}_{SF} pokazuje wrażliwość sygnałów diagnostycznych na poszczególne uszkodzenia.

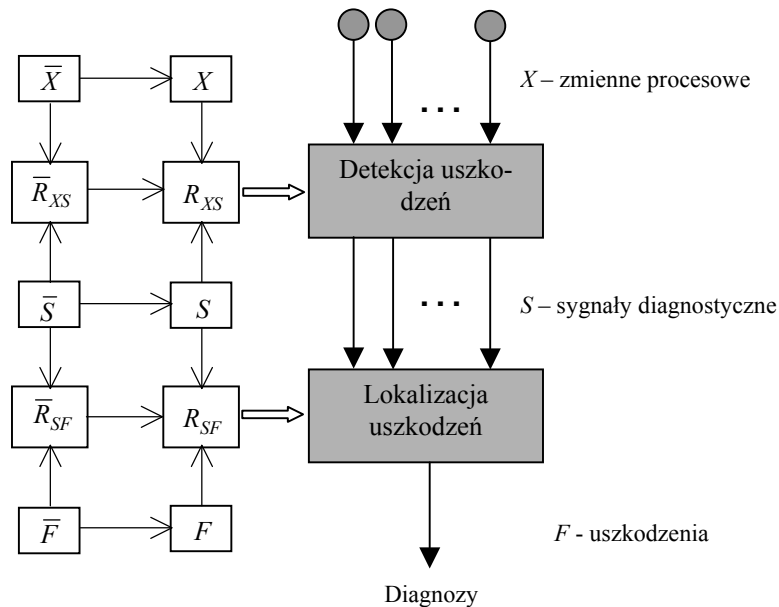
W trakcie eksploatacji mają miejsce zmiany struktury procesów przemysłowych. Niektóre aparaty technologiczne mogą być czasowo wyłączane. Zmiany takie powodują eliminację ze zbioru uszkodzeń \bar{F} oraz zbioru zmiennych procesowych \bar{X} tych elementów, które są związane z odłączonymi urządzeniami. W wyniku tego konieczna jest adaptacja systemu diagnostycznego przez odpowiednią redukcję zbioru \bar{S} oraz relacji \bar{R}_{XS} , \bar{R}_{SF} . Ponowne włączenie aparatów technologicznych wymaga działań odwrotnych.

Urządzenia pomiarowe mogą być chwilowo odłączane dla celów justowania i remontów, a ponadto występują również uszkodzenia tych urządzeń. Oznacza to zmiany zbioru \bar{X} oraz redukcję ze zbioru \bar{F} uszkodzeń torów pomiarowych, które zostały odłączone. W konsekwencji wymagane jest odpowiednie dostosowywanie zbioru algorytmów detekcyjnych \bar{S} oraz relacji \bar{R}_{XS} , \bar{R}_{SF} .

Zmienność zbioru realizowanych algorytmów diagnostycznych, a zatem zbioru wyliczanych sygnałów diagnostycznych \bar{S} wynika także z organizacji samego algorytmu diagnozowania.

Czasowo nieprzydatne stają się bowiem wyniki algorytmów detekcyjnych, kontrolujących wcześniej rozpoznane uszkodzenia. Nie mogą być one wykorzystane do chwili ponownego przywrócenia stanu zdatowności danej części obiektu. Zbiór sygnałów diagnostycznych S dostępnych w danej chwili diagnozowania jest podzbiorem pełnego zbioru sygnałów diagnostycznych \bar{S} , podobnie relacje R_{XS}, R_{SF} są podzbiorem relacji pełnych $\bar{R}_{XS}, \bar{R}_{SF}$.

W praktyce system diagnostyczny operuje nie na pełnych zbiorach: $\bar{X}, \bar{S}, \bar{F}, \bar{R}_{XS}, \bar{R}_{SF}$, lecz na ich podzbiórach: X, S, F, R_{XS}, R_{SF} . Ilustruje to rys. 6. Wynika to ze zmienność obiektu diagnozowania i konieczności adaptowania się do tych zmian przez system diagnostyczny.



Rys. 6. Schemat diagnostowania z zaznaczonymi zbiorami podlegającymi zmianom w trakcie funkcjonowania systemu

6.2. Mechanizmy automatycznej adaptacji systemu diagnostycznego do zmian strukturalnych

Aby system diagnostyczny był odporny na omówione powyżej zmiany strukturalne konieczne jest prowadzenie wszystkich operacji wnioskowania diagnostycznego na bieżąco, uwzględniając zachodzące zamiany zbiorów zmiennych procesowych, sygnałów diagnostycznych, uszkodzeń oraz związków między tymi zbiorami [13, 16, 34]. Systemy diagnostyczne dla procesów przemysłowych muszą ten problem uwzględniać i skutecznie go rozwiązywać.

Dla osiągnięcia wymaganej odporności istotne znaczenie ma zapis związku między uszkodzeniami a wartościami sygnałów diagnostycznych. Funkcje logiczne, drzewa diagnostowania, binarna macierzy diagnostyczna, system informacyjny określone na etapie projektowania systemu diagnostycznego są sztywne i nie odporne na zmiany struktury obiektu. Również w regułach typu:

$$\text{if}(s_1 = v_{1,k}) \dots \cap (s_j = v_{j,k}) \dots \cap (s_J = v_{J,k}) \text{ then}(f_k) \quad (1)$$

przy zmianach zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych, zmianom ulega zbiór przesłanek. Ponadto w przypadku systemów dużej skali, gdzie liczba realizowanych testów jest bardzo duża, reguły typu (1) są niewygodne ze względu na bardzo dużą liczbę przesłanek.

Odporną, w aspekcie możliwych zmian struktury obiektu, metodą zapisu relacji diagnostycznej są reguły o postaci:

$$\text{if}(s_j = v) \text{ then } (f_k \text{ or } f_n \text{ or } \dots \text{ or } f_r) , \quad (2)$$

w których poszczególnym symptomom przyporządkowane są podzbiory uszkodzeń wywołujących te symptomy. Ta zależność jest niezmienna. W przypadku zmian struktury obiektu lub w wyniku wcześniejszych diagnoz reguła taka może zostać chwilowo wyeliminowana ze zbioru reguł aktywnych, lecz jej postać jest niezmienna. Reguła taka ma zwartą postać, bowiem liczba wskazywanych w konkluzji możliwych uszkodzeń nie jest duża, szczególnie w przypadku stosowania modeli cząstkowych. Ponadto taka postać reguł jest wygodna przy rozszerzaniu bazy reguł po wprowadzeniu nowych testów.

Skuteczną metodą umożliwiającą łatwą adaptację systemu wnioskowania do omówionych zmian jest zasada dynamicznej dekompozycji obiektu (DDS – *Dynamic Decomposition of diagnosed System*) [13, 16, 21, 28]. Polega ona na wyodrębnieniu podobiektu, w którym poszukiwane jest uszkodzenie, na podstawie pierwszego zaobserwowanego symptomu. Na podstawie reguły (2) opisującej ten symptom określany jest zbiór możliwych uszkodzeń $F^1 = F(s_x = v)$. Obejmuje on wszystkie uszkodzenia wskazane w konkluzji tej reguły. Następnie wybierane są z bazy te reguły, dla których w konkluzji wskazywane są uszkodzenia ze zbioru F^1 . Tak określony podzbiór reguł stosowany jest do rozpoznania stanu obiektu. Określa on jednoznacznie zbiór sygnałów diagnostycznych $S^1 = \{s_j \in \bar{S} : F^1 \cap F(s_j = v) \neq \emptyset\}$, które zostaną wykorzystane do sformułowania diagnozy. W przypadku braku dostępności któregoś z sygnałów diagnostycznych ze zbioru S^1 jest on z niego eliminowany, co zwykle zmniejsza precyzję diagnozy (rozdzielność uszkodzeń), lecz zabezpiecza przed błędami wnioskowania.

Powyższa metoda może zostać zilustrowana jako wydzielenie odpowiedniego podzbioru relacji diagnostycznej na podstawie pierwszego zaobserwowanego symptomu. Na rys. 7 pokazano przykład wyznaczenia podsystemu relacji diagnostycznej zainicjowanego powstaniem symptomu $s_6 = 1$.

	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀
S ₁	1					1	1			
S ₂	1	1			1		1			
S ₃			1	1						
S ₄		1	1		1					
S ₅	1				1	1	1			
S ₆						1				
S ₇						1	1	1		
S ₈								1	1	
S ₉								1	1	1
S ₁₀									1	1

	f ₁	f ₅	f ₆	f ₇
S ₁	1		1	1
S ₂	1	1		1
S ₄		1		
S ₅	1	1	1	1
S ₆		1		
S ₇			1	1

Rys. 7. Sposób określenia podsystemu relacji diagnostycznej zainicjowanego powstaniem symptomu $s_6 = 1$

Wnioskowanie w wydzielonym podsystemie stanowi samodzielny wątek lokalizacji uszkodzeń prowadzony zwykle przy założeniu uszkodzeń pojedynczych. Po sformułowaniu diagnozy zbiór dostępnych sygnałów diagnostycznych (a także zbiór wykorzystywanych reguł) powinien być pomniejszany o te sygnały, które są wrażliwe na wykryte uszkodzenie. Ich wartości są bowiem zdeterminowane przez istnienie rozpoznanego uszkodzenia. Mogą one być

ponownie włączone do zbioru dostępnych sygnałów diagnostycznych po automatycznym rozpoznaniu przywrócenia stanu zdatności uszkodzonego elementu [14, 16].

Odporne metody rozpoznawania uszkodzeń zostały przedstawione w pracach [13, 25].

7. PROBLEM OPÓŹNIEŃ POWSTAWANIA SYMPTOMÓW

7.1. Charakterystyka problemu

Obiekt diagnozowania jest układem dynamicznym, a zatem od chwili wystąpienia uszkodzenia do chwili powstania mierzalnego symptomu tego zdarzenia upływa określony czas, zależny m.in. od własności dynamicznych testowanej części obiektu. To samo uszkodzenie jest wykrywane po niejednakowym upływie czasu przez różne sygnały diagnostyczne. Jeśli algorytm lokalizacji uszkodzeń nie ma wbudowanych mechanizmów uodporniających przebieg wnioskowania na opóźnienia symptomów, to może generować fałszywe diagnozy. Różne sposoby rozwiązania tego problemu omówiono w pracach [13, 14, 16, 22, 23, 35].

7.2. Metody rozwiązania

Istnieje kilka sposobów, aby problem ten rozwiązać. Zakładamy przy tym, że kolejności symptomów nie można wyznaczyć w sposób analityczny ze względu na brak modeli obiektu uwzględniających wpływ uszkodzeń. Stosowane są następujące rozwiązania:

- Wnioskowanie wykorzystujące test stanu ustalonego do sformułowania diagnozy. Diagnoza formułowana jest dopiero po ustaleniu się wartości residuów. Rozpoznanie stanów ustalonych dla określonych podzbiorów residuów nie jest zadaniem prostym.
- Wnioskowania na podstawie symptomów [22]. W algorytmie tym brane pod uwagę są jedynie symptomy (różne od zera wartości sygnałów diagnostycznych) a pomijane zerowe wartości tych sygnałów. Prowadzi to jednak do zmniejszenia rozróżnialności uszkodzeń podczas diagnozowania, co uwidacznia się wskazywaniem w diagnozach większej liczby możliwych uszkodzeń niż przy diagnozowaniu z uwzględnieniem czasów symptomów.
- Wnioskowanie na podstawie symptomów z uwzględnieniem znanych relacji między opóźnieniami różnych symptomów tego samego uszkodzenia, przy czym wiedza o tych relacjach nie musi być kompletna. Relacje takie mogą zostać określone na podstawie znajomości obiektu i algorytmów detekcyjnych lub też na podstawie analizy grafu przyczynowo skutkowego, stanowiącego model jakościowy procesu. Algorytm taki [23] stanowi rozszerzenie i ulepszenie algorytmu wnioskowania na podstawie symptomów. Charakteryzuje się większą rozróżnialnością uszkodzeń w stosunku do wersji podstawowej, a jednocześnie w pełni zabezpiecza przed błędami wnioskowania, wynikającymi z niejednakowych opóźnień powstawania symptomów.
- Wnioskowanie wykorzystujące wartości maksymalnych opóźnień symptomów [14]. We wnioskowaniu wykorzystywane są nie tylko symptomy, ale także informacje o zerowych wartościach sygnałów diagnostycznych, oznaczających brak symptomu. Wartości te muszą zostać określone na podstawie wiedzy eksperckiej. Zwykle podawane są one w sposób bezpieczny, co powoduje wydłużenie czasu wnioskowania.
- Wnioskowanie z uwzględnieniem przedziału opóźnień symptomów dla każdej pary uszkodzenie-symptom [24]. Metoda ta stanowi rozszerzenie poprzedniej. Pozwala ona uzyskać większą rozróżnialność uszkodzeń niż pozostałe oraz skrócenie czasu diagnozowania. Wymaga jednak wprowadzenia wiedzy o przedziałach opóźnień symptomów, która jest trudna do określenia.

Największe znaczenie praktyczne spośród wymienionych mają metody wnioskowania na podstawie symptomów. Wykorzystanie dodatkowej wiedzy o relacjach między opóźnieniami par różnych symptomów tego samego uszkodzenia pozwala podwyższyć dokładność diagnozowania. Wzrost rozróżnialności jest tym większy im pełniejsza jest wiedza o relacjach między opóźnieniami symptomów.

Dobre rezultaty daje także połączenie metod wnioskowania na podstawie symptomów z metodami wykorzystującymi wszystkie wartości sygnałów diagnostycznych oraz wiedzę o opóźnieniach symptomów. Stosując równolegle dwie metody można sformułować diagnozę podając jej górne i dolne przybliżenie. Przybliżenie górne zawiera większy zbiór możliwych uszkodzeń. Diagnoza sformułowana wyłącznie na podstawie symptomów może być zatem traktowana jako górne przybliżenie diagnozy. Przybliżenie dolne określa minimalny zbiór możliwych uszkodzeń wskazany przy danym zbiorze residuów (sygnałów diagnostycznych). Jako dolne przybliżenie diagnozy można traktować diagnozę sformułowaną z uwzględnieniem wszystkich wartości sygnałów diagnostycznych oraz wiedzy o przedziałach opóźnień symptomów.

8. PROBLEM USZKODZEŃ WIELOKROTNYCH

8.1. Charakterystyka problemu

W przypadku złożonych instalacji przemysłowych, ze względu na dużą liczbę urządzeń i ograniczoną ich niezawodność, uszkodzenia wielokrotne mogą stanowić poważny problem. Metody rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych były tematem publikacji [16, 17, 27, 28]. Uszkodzenia wielokrotne mogą powstawać kolejno lub jednocześnie. Najtrudniejsze do rozpoznania są uszkodzenia występujące jednocześnie. Może się wydawać, że w praktyce sytuacja taka może wystąpić bardzo rzadko, jeśli rozpatrujemy uszkodzenia niezależne. Okazuje się jednak, że problem ten występuje praktycznie przy każdym rozruchu systemu diagnozującego dużą instalację technologiczną. W chwili rozruchu wszystkie wcześniej powstałe uszkodzenia są widziane przez system, jako uszkodzenia jednoczesne. Brak mechanizmu rozpoznawania takich uszkodzeń może doprowadzić do nieprawidłowego funkcjonowania systemu diagnostycznego.

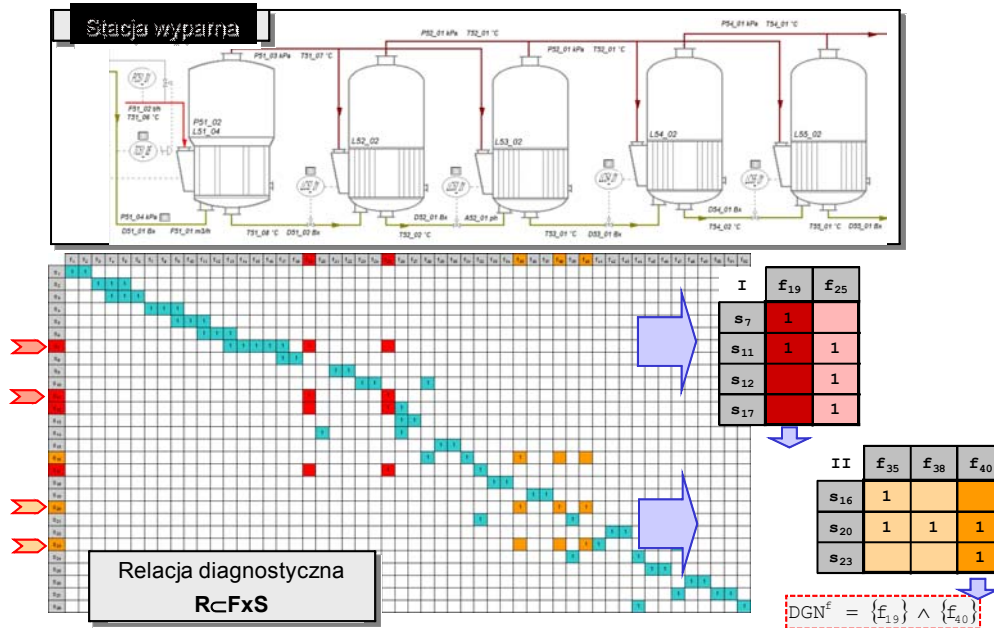
8.2. Metoda rozwiązania

W pracach [16, 27] wykazano, że zarówno uszkodzenia pojedyncze jak też większość uszkodzeń wielokrotnych może być skutecznie lokalizowana przy założeniu uszkodzeń pojedynczych pod warunkiem, że algorytm wnioskowania diagnostycznego wykorzystuje metodę dynamicznej dekompozycji obiektu (omówioną w p. 6.2). Jest to istotne, gdyż założenie uszkodzeń pojedynczych powoduje znaczne uproszczenie algorytmu lokalizacji uszkodzeń.

Jeśli uszkodzenia występują kolejno w odstępach większych, niż czas formułowania kolejnych diagnoz, to diagnozy generowane przy założeniu występowania uszkodzeń pojedynczych są prawidłowe. Należy jednak podkreślić, że po każdej diagnozie zbiór dostępnych sygnałów diagnostycznych powinien być pomniejszany o te sygnały, które są wrażliwe na wykryte uszkodzenie. Mogą one być ponownie włączone do zbioru dostępnych sygnałów diagnostycznych po przywróceniu stanu zdatności uszkodzonego elementu. Zbiór S interpretujemy zatem jako zmienny, modyfikowany wg zasad podanych w [11, 13, 14, 16].

Wykorzystanie metody DDS jest niezwykle użyteczne przy rozpoznawaniu uszkodzeń wielokrotnych. Dynamiczna Dekompozycja Systemu ta polega na tym, że po każdym wykryciu symptomu wydzielany jest odpowiedni podsystem, określony przez podzbiory możliwych

uszkodzeń F^l i sygnałów diagnostycznych S^l , wykrywających te uszkodzenia. Dla tak wydzielonego podsystemu prowadzone jest dalsze diagnozowanie. W [16, 28] pokazano, że uszkodzenia wielokrotne występujące jednocześnie lub w krótkich odstępach czasu będą prawidłowo lokalizowane przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, jeśli podzbiory testów przydatnych do ich rozpoznania są rozłączne: $S^{lj} \cap S^{lk} = \emptyset$. Oznacza to, że w praktyce prowadzone mogą być równoległe odrębne wątki wnioskowania związane z lokalizacją uszkodzeń w każdym z wyodrębnionych dynamicznie podsystemów. Wnioskowanie diagnostyczne z zastosowaniem metody DDS zilustrowano na rys. 8.



Rys. 8. Wnioskowanie diagnostyczne dla stacji wyparnej cukrowni z zastosowaniem metody DDS

Jeśli warunek rozłączności podzbiorów testów w wydzielonych podsystemach nie jest spełniony, to proces wnioskowania dla takiej pary powinien być prowadzony, przy założeniu uszkodzeń podwójnych lub ogólnie uszkodzeń wielokrotnych. Efektywny algorytm rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych podano w pracy [29]. Redukuje on skutecznie liczbę rozpatrywanych kombinacji uszkodzeń wielokrotnych.

9. NIEPEWNOŚCI DIAGNOZOWANIA

9.1. Charakterystyka problemu

Wnioskowanie diagnostyczne może prowadzić do powstawania fałszywych diagnoz jeśli nie uwzględni niepewności symptomów. Ponadto w praktyce nigdy nie ma pewności, czy w fazie projektowania systemu diagnostycznego uwzględniono wszystkie możliwe uszkodzenia. Wystąpienie uszkodzeń, dla których nie wprowadzono wiedzy o relacji uszkodzenia-symptomy prowadzi albo do wskazywania innych uszkodzeń (nierozróżnialnych z pominiętymi), albo do występowania kombinacji wyników testów różnych od sygnatur uszkodzeń uwzględnionych w bazie wiedzy.

9.2. Metoda rozwiązania – wnioskowanie rozmyte

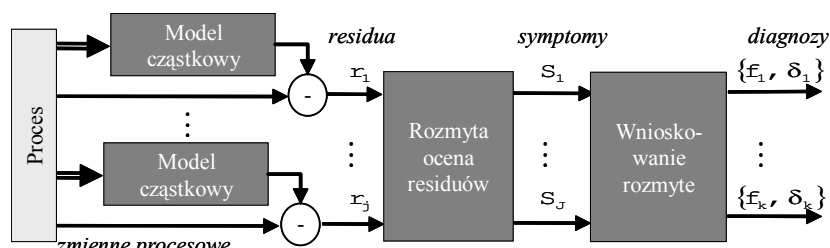
Skuteczną metodą wnioskowania przy niepewnych i nieprecyzyjnych danych jest logika rozmyta [11, 15, 16, 18, 19]. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie sieci bayerowskich

[5, 13]. Wynikiem zastosowania logiki rozmytej do oceny residuów są rozmyte sygnały diagnostyczne. Wartość rozmytego sygnału określona jest przez współczynniki przynależności wyliczonej wartości residuum do poszczególnych zbiorów rozmytych.

$$s_j = \{ \langle \mu_{ji}, v_{ji} \rangle : v_{ji} \in V_j \}, \quad (3)$$

gdzie: μ_{ji} - współczynnik przynależności j -tego residuum do zbioru rozmytego v_{ji} .

Ogólny schemat diagnozowania bazującego na zastosowaniu: modeli cząstkowych do detekcji uszkodzeń oraz rozmytego wnioskowania o uszkodzeniach przedstawiono na rys. 9. Charakterystyczny jest brak bloku wyostrażania. Diagnoza wskazuje uszkodzenia oraz odpowiadające im stopnie aktywacji reguł, które są interpretowane jako wskaźniki przekonania o wystąpieniu poszczególnych uszkodzeń.



Rys. 9. Schemat diagnozowania z zastosowaniem logiki rozmytej.

Wnioskowanie rozmyte polega na wyliczeniu stopni aktywacji reguł określanych on-line dla bloków elementarnych E_m (podzbiorów uszkodzeń nierozróżnialnych). Reguły mają postać:

$$\text{if } (s_1 = v_1) \wedge \dots \wedge (s_j = v_j) \wedge \dots \wedge (s_n = v_n) \text{ then } (f_k \vee f_m \vee \dots); s \in S^1, f \in E_m \quad (4)$$

Są one określane, tak jak bloki elementarne, dynamicznie w trakcie wnioskowania na podstawie wiedzy o relacji uszkodzenia-symptomy zawartej w bazie danych (np. w postaci reguł typu (2)) oraz aktualizowanych na bieżąco zbiorów uszkodzeń F , zmiennych procesowych X oraz sygnałów diagnostycznych S . Stopień aktywacji reguły będącej rozmytą koniunkcją przesłanek prostych jest wyznaczany zgodnie z wyrażeniem:

$$\mu(f_k) = \mu(E_m, s_1) \otimes \dots \otimes \mu(E_m, s_j) \otimes \dots \otimes \mu(E_m, s_n), \quad (5)$$

gdzie: \otimes - ogólny operator koniunkcji rozmytej.

Do wyznaczania stopnia aktywacji reguły, będącej koniunkcją przesłanek prostych, stosowane są operatory t-normy, np. operator PROD lub MIN. Operator PROD jest definiowany jako iloczyn współczynników spełnienia wszystkich przesłanek prostych w regule:

$$\mu(E_m)_{PROD} = \mu(E_m, s_1) \cdot \dots \cdot \mu(E_m, s_j) \cdot \dots \cdot \mu(E_m, s_n). \quad (6)$$

Stopień aktywacji reguły (4) przyjmuje wartości z przedziału $[0, 1]$. Jest on interpretowany jako współczynnik pewności istnienia któregoś z uszkodzeń wskazanych w konkluzji reguły. Informacja ta stanowi diagnozę generowaną na wyjściu algorytmu rozmytej lokalizacji uszkodzeń. Ma ona postać zbioru par: współczynnik pewności wystąpienia uszkodzenia należącego do bloku elementarnego, blok elementarny.

$$DGN = \{ \langle \mu(E_m), E_m \rangle : \mu(E_m) > G \}, \quad (7)$$

gdzie: G jest pewną progową wartością stopnia aktywacji reguły, przy której uszkodzenie jest wskazywane w diagnozie (np. $G = 0, 1$).

Wykorzystanie reguł (4) dla bloków funkcjonalnych zawierających uszkodzenia nierozróżnialne powoduje, że nowa baza reguł jest niesprzeczna. Zastosowanie operatora PROD do wyznaczenia stopnia zapłonu reguły ma istotną zaletę. Pozwala stwierdzić kompletność i niesprzeczność bazy reguł. Jeśli suma stopni spełnienia przesłanek wszystkich reguł jest równa 1, dla dowolnego stanu wejść (przesłanek), to baza reguł jest kompletna i niesprzeczna [32]:

$$\sum_{m=0}^{m=M} \mu(E_m)_{PROD} = 1 . \quad (8)$$

Wykorzystywana w danym procesie wnioskowania baza reguł nie jest zwykle kompletna, w tym sensie, że nie zawiera reguł dla wszystkich możliwych kombinacji wartości sygnałów diagnostycznych. W praktyce nie wszystkie takie kombinacje są możliwe. W praktyce nigdy nie można mieć pewności, że przyjęty zbiór uszkodzeń zawiera wszystkie możliwe uszkodzenia. Nieuwzględnione w bazie reguły odpowiadają także stanom obiektu z uszkodzeniami wielokrotnymi oraz stanom z pominiętymi uszkodzeniami.

Wartość sumy stopni aktywacji wszystkich reguł w bazie, wyliczonej z zastosowaniem operatora PROD, należy do przedziału $[0, 1]$. Stanowi ona miarę pewności uzyskanej diagnozy. Im wartość sumy jest bliższa 1, tym pewniejsza diagnoza. Niska wartość sumy może świadczyć o nieuwzględnieniu w bazie wszystkich uszkodzeń, wystąpieniu uszkodzeń wielokrotnych lub też powstaniu fałszywych wartości sygnałów diagnostycznych na skutek dużych zakłóceń.

Miarą niepewności generowanej diagnozy, a zatem miarą przekonania o wystąpieniu innego, nieznanego stanu obiektu jest wartość wskaźnika μ_{US} :

$$\mu_{US} = 1 - \sum_{m=0}^{m=M} \mu(E_m)_{PROD} . \quad (9)$$

Jeśli rozpatrywane są w systemie diagnostycznym stany z uszkodzeniami wielokrotnymi, to wskaźnik (9) przyjmuje wysokie wartości w przypadku wystąpienia uszkodzeń, które zostały pominięte w fazie projektowania systemu (brak ich w zbiorze F).

Algorytmy wnioskowania diagnostycznego przeznaczone do diagnozowania złożonych instalacji przemysłowych, wykorzystujące logikę rozmytą, przedstawione zostały w pracach [11, 14, 15, 16, 25].

10. SYSTEMY AMANDD i DIASTER

Omówione powyżej metody podwyższenia odporności systemu diagnostycznego zostały zaimplementowane w opracowanych systemach AMANDD oraz DIASTER. System AMANDD został opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej w ramach projektu Unii Europejskiej „CHEM” oraz dwóch zadań badawczych w Programie Wieloletnim PW-004, ustanowionym przez Radę Ministrów RP.

Głównym zadaniem systemu AMANDD [20, 26] jest wczesne i dokładne rozpoznawanie nieprawidłowych stanów procesu przemysłowego oraz uszkodzeń urządzeń technologicznych, wykonawczych i pomiarowych (rys. 10). W stanach nienormalnych i awaryjnych system wspomaga operatorów procesu poprzez przekazywanie im generowanych diagnoz o uszkodzeniach i ewentualnie komunikatów doradczych informujących o niezbędnych działaniach zabezpieczających. Diagnozy znacznie dokładniej określają stan procesu niż sekwencje alarmów generowanych we współczesnych systemach automatyki. Dodatkowo system wyposażony jest w zaawansowane narzędzia do modelowania obiektów, co umożliwia tworzenie

programowych sensorów i analizatorów. Dzięki rozbudowanemu modułowi przetwarzania zmiennych przy jego pomocy można również łatwo budować symulatory procesów. System jest przeznaczony do zastosowania w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym, energetycznym, hutniczym, spożywczym i wielu innych.

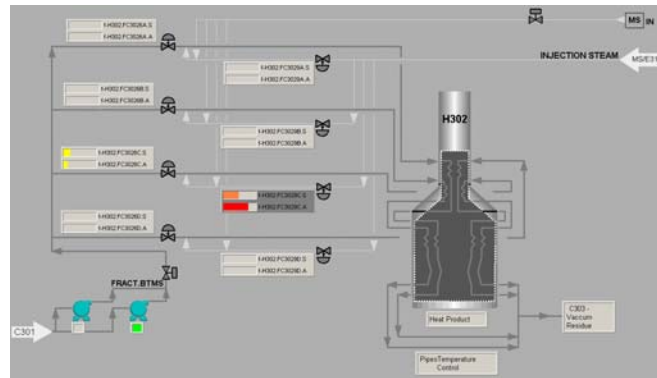
System AMANDD jest dostosowany do współpracy z różnymi zdecentralizowanymi systemami automatyki (DCS), jak również systemami nadzorowania i monitorowania procesów (SCADA). Dane pomiarowe do systemu diagnostycznego doprowadzane są na drodze transmisji cyfrowej pomiędzy systemem automatyki a systemem AMANDD z wykorzystaniem standardu OPC lub innych rozwiązań komunikacyjnych.



Rys. 10. Podstawowe zadania systemu AMandD

Szczegółowe badania systemu AMANDD przeprowadzono w laboratorium Uniwersytetu w Lille, gdzie system wdrożono do diagnozowania instalacji generatora pary. System został także pilotowo wdrożony w 2004 r. do diagnozowania części instalacji IDR w zakładzie produkcji mocznika w Zakładach Azotowych Puławy oraz do diagnostyki stacji wyparnej w cukrowni Lublin [33]. W 2008 r. prowadzono pilotażowe testy systemu AMANDD w PKN ORLEN na instalacji hydroodsierczania gudronu (HOG) [27]. Zadaniem systemu jest wczesne wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń urządzeń pomiarowych i wykonawczych w obrębie pieca H302 oraz kolumny destylacji próżniowej C303. Ma to na celu ograniczenie ryzyka wystąpienia stanów niebezpiecznych i awaryjnych w instalacji, a tym samym związanych z nimi przestojów. Odrębnym realizowanym przez system zadaniem jest monitorowanie stopnia zakoksovania aparatów technologicznych pieca oraz kolumny destylacji próżniowej w celu realizacji strategii utrzymania ruchu na podstawie bieżącej oceny stanu technicznego instalacji.

Wypracowywane diagnozy dotyczące uszkodzeń nagłych są prezentowane w bezpośrednio w systemie AMANDD. Na schematach synoptycznych rozmieszczone są wskaźniki odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom, na których wyświetlana jest wartość wskaźnika pewności istnienia danego uszkodzenia w zakresie 0-1. Jeśli wartość wskaźnika jest wysoka, to słupek ilustrujący tę wartość ma kolor czerwony. Przy niższych wartościach przyjmuje on kolejno kolor fioletowy, żółty, a przy wartościach bliskich zera ma kolor biały. Na rys. 11 pokazano wizualizację uszkodzeń zaworów regulacyjnych oraz torów pomiarowych przepływu mazutu i pary w piecu H302.



Rys. 11. Wizualizacja diagnoz

DIAS^{TER} [13,26,37] stanowi nową, rozszerzoną funkcjonalnie i programowo wersję systemu AMAND^D. Jest on rozwijany przez zespół badawczy, w skład którego wchodzi specjaliści z Politechniki Warszawskiej, Politechniki Śląskiej, Politechniki Rzeszowskiej oraz Uniwersytetu Zielonogórskiego w ramach grantu rozwojowego: *Inteligentny system diagnostyki i wspomaganie sterowania procesów przemysłowych „DIAS^{TER}”*.

Głównym zadaniem systemu DIAS^{TER} jest realizacja zaawansowanych funkcji modelowania procesów, sterowania nadrzędnego, optymalizacji oraz diagnostyki procesów przemysłowych. System wyposażony jest w zaawansowane narzędzia do modelowania obiektów niezbędnych do celów sterowania, nadzoru, optymalizacji i diagnostyki procesów. Umożliwiają one także tworzenie programowych sensorów i analizatorów oraz wydobywanie wiedzy z baz danych systemów SCADA i DCS. Dzięki rozbudowanemu modułowi przetwarzania zmiennych procesowych można realizować symulatory procesów. System umożliwia realizację zaawansowanych algorytmów sterowania nadrzędnego oraz optymalizacji punktów pracy procesów. Ponadto dostępne są narzędzia do nadrzędnego strojenia oraz adaptacji pętli regulacyjnych w sterownikach współpracującego systemu automatyki. W stosunku do AMAND^Da funkcje diagnostyczne zostały rozszerzone. Udoskonalona została także platforma informacyjna systemu.

System zawiera (podobnie jak AMAND^D) implementację szerokiej gamy najnowszych algorytmów z zakresu obliczeń inteligentnych, zastosowanych w oprogramowaniu do modelowania, sterowania nadrzędnego, optymalizacji, detekcji i lokalizacji uszkodzeń. DIAS^{TER} ze względu na otwartą architekturę umożliwia połączenie z praktycznie dowolnym systemem automatyki.

11. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono główne problemy diagnostyki procesów przemysłowych. System przeznaczony do diagnozowania procesów przemysłowych powinien być wyposażony w takie algorytmy diagnozowania, które wszystkie wymienione problemy uwzględniają i efektywnie rozwiązują. Aktualnie rozwiązań takich nie oferują wiodące firmy w branży automatyki. Systemy AMAND^D oraz DIAS^{TER} są pod tym względem unikatowe.

Systemy diagnostyczne dla procesów przemysłowych nie są jeszcze rozpowszechnione w przemyśle, lecz znajdują się na etapie badań pilotażowych i pierwszych wdrożeń. Można przewidywać, że w niedługim czasie nastąpi gwałtowny rozwój systemów sterowania wyposażonych w oprogramowanie do diagnostyki procesów oraz przyrost liczby zastosowań przemysłowych. Pewną barierą utrudniającą aplikacje przemysłowe jest brak dostatecznej

liczby specjalistów w tym zakresie. Jednak obecnie na wielu uczelniach zagadnienia te są ujęte w programach kształcenia i młodzi inżynierowie będą przygotowani do podejmowania zadań związanych z bieżącą diagnostyką procesów. Wprowadzanie systemów diagnostycznych wymuszone zostanie także nowymi wymaganiami związanymi z szeroko rozumianym bezpieczeństwem i ochroną środowiska naturalnego oraz dążeniem do redukcji strat ekonomicznych związanych z uszkodzeniami.

LITERATURA

- [1] Basseville M., Nikiforov I.V. (1993). *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [2] Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. (2004). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag.
- [3] Calado J.M.F., Korbicz J., Patan K., Patton R.J., Sá da Costa J.M.G. (2001). Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems. *European Journal of Control*, 7 (2-3), 248-286.
- [4] Chen J., Patton R. (1999). *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [5] Cholewa W., Chrzanowski P., Rogala T. (2009). Diagnostyka z zastosowaniem sieci przekaźników w systemie DiaSter. W: *Systemy Wykrywające, Analizujące i Tolerujące Usterki*. Pod redakcją Z. Kowalczyka, PWNT Gdańsk, 77-84.
- [6] Frank P.M. (1987). Fault diagnosis in dynamic systems via state estimations methods. A survey. In: *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge Based Approaches*. (Eds. S.G. Tzafestas et al.), vol. 2, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- [7] Frank P.M. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica*, 26, 459-474.
- [8] Frank P.M., Marcu T. (2000). Diagnosis strategies and system: principle, fuzzy and neural approaches. *Intelligent Systems and Interfaces*, (Eds. Teodorescu H.-N. et al.), Boston: Kulwer.
- [9] Gertler J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York-Basel-Hong Kong.
- [10] Isermann R. (2006). *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, New York: Springer-Verlag, 2006.
- [11] Korbicz J., Kościelny J.M. Kowalczyk Z., Cholewa W (Eds). (2004). *Fault Diagnosis: Models, artificial intelligence methods, applications*. Springer.
- [12] Korbicz J. (2006). Robust fault detection using analytical and soft computing methods. *Bulletin of the Polish Academy Sciences. Technical Sciences*, 2006, 54 (1), 75-88
- [13] Korbicz J., Kościelny J.M. (red.). (2009). *Modelowanie diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter*. WNT, Warszawa.
- [14] Kościelny J.M. (1995). Fault Isolation in Industrial Processes by Dynamic Table of States Method. *Automatica*, 31(5), 747-753.
- [15] Kościelny J.M., Sędziak D., Zakroczyński K. (1999). Fuzzy Logic Fault Isolation in Large Scale Systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 9 (3), 637-652.

- [16] Kościelny J.M.(2001): Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- [17] Kościelny J.M., Bartyś M. (2003): Multiple fault isolation in diagnostic of industrial processes. European Control Conference 2003 ECC'2003. UK, Cambridge, vol. 4, 1-6.
- [18] Kościelny, J. M., Syfert M. (2003). Fuzzy logic application to diagnostics of industrial processes. 5th IFAC Symposium SAFEPROCESS'2003, Washington D.C., USA, 771-776.
- [19] Kościelny J. M., Syfert M. (2006). Fuzzy Diagnostic Reasoning that Takes Into Account the Uncertainty of the Faults-Symptoms Relation, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 16 (1), 27-35.
- [20] Kościelny J.M., Syfert M., Wnuk P. (2006). Advanced monitoring and diagnostic system 'AMandD'. A Proc. Volume from the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Beijing, P.R. China, August 29-September 1, Elsevier, Vol. 1, 635-640.
- [21] Kościelny J., Bartyś.M., Syfert M. (2006). The practical problems of fault isolation in large scale industrial systems. Safeprocess2006 - 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Beijing, P.R. China, August 29-September 1, CD.
- [22] Kościelny J.M., Syfert M. (2007). The issue of symptom based diagnostic reasoning. In: Recent Advances in Mechatronics. (Eds. Jabłoński R., Turkowski M., Szewczyk R.) Springer, 167-171.
- [23] Kościelny J.M. (2008). Problemy rozpoznawania uszkodzeń w procesach przemysłowych, W. Sterowanie i Automatykacja: Aktualne problemy i ich rozwiązania. Red. K. Malinowski, L. Rutkowski. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Komitet Automatyki i Robotyki PAN, Polskie Towarzystwo Sieci neuronowych, 519-527.
- [24] Kościelny J. M., Syfert M., Dziembowski B.(2008). Fault Diagnosis with Use of the Knowledge about Symptoms Delays Interval. 17th World Congress of IFAC, Seoul, July 6-11, 2008, CD.
- [25] Kościelny J.M., Syfert M. (2009). Odporna lokalizacja uszkodzeń w systemie DiaSter. W: Systemy Wykrywające, Analizujące i Tolerujące Usterki. Pod redakcją Z. Kowalczyka, PWNT Gdańsk, 49-56.
- [26] Kościelny J.M.(2009). Zaawansowana diagnostyka procesów i układy regulacji tolerujące uszkodzenia. Przegląd Elektrotechniczny, R85, Nr 9/2009, 207-214.
- [27] Kościelny J.M., Syfert M., Leszczyński M, Gąsecki A.(2009). Pilot tests of the advanced system of process diagnostics in PKN ORLEN. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 55, nr 3/2009, 136-140.
- [28] Kościelny J.M., Bartyś M. (2009). Application of the Method of Dynamic Decomposition for Recognition of Multiple Faults in the Large Scale Systems 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD'2009, 19-20 November, Zielona Góra, Poland, CD.

- [29] Kościelny J.M., Bartyś M., Syfert M. (2009). Method of Multiple Fault Isolation in Diagnostics of Large Scale Systems. 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD'2009, 19-20 November, Zielona Góra, Poland, CD.
- [30] Patton R.J., Lopez-Toribio C.J., Uppal F.J. (1999). Artificial intelligence approaches to fault diagnosis for dynamic systems. *Int. Jour. of Applied Mathematics and Computer Science*, 9 (3), 471-518.
- [31] Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.) (2000). *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer.
- [32] Piegat A. (1999). *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- [33] Syfert, M. Rzepiejewski P., Wnuk P., Kościelny J. M. (2005). Current diagnostics of the evaporation station. 16th IFAC World Congress, Praga.
- [34] Syfert M., Kościelny J.M. (2009). The issue of diagnostic reasoning in the case of variability of diagnosed system structure. W: *Fault Detection, Analysis and Tolerant Systems*. Edited by Z. Kowalczyk, PWNT Gdańsk, 237-244.
- [35] Syfert M., Kościelny J.M. (2009). Diagnostic Reasoning Based on Symptom Forming Sequence. 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SafeProcess 2009), June 30 - July 3, 2009 Barcelona, Spain, CD.
- [36] Witczak M. (2007): *Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-Linear Systems. From analytical to soft computing approaches*. Springer-Verlag, Berlin.
- [37] Wnuk P., Syfert M., Kościelny J.M. (2009). Inteligentny system sterowania i diagnostyki procesów przemysłowych DiaSter. W: *Systemy Wykrywające, Analizujące i Tolerujące Usterki*. Pod redakcją Z. Kowalczyka, PWNT Gdańsk, 57-65.

„Praca naukowa finansowana częściowo ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy rozwojowy R01 012 02”.