

Jan Maciej KOŚCIELNY, Michał SYFERT, Michał BARTYŚ

INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ,
ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

Diagnostyka złożonych procesów przemysłowych – ograniczenia, wymagania, problemy**Prof. dr hab. inż. Jan Maciej KOŚCIELNY**

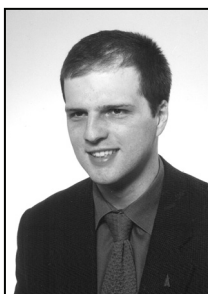
Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. Kierownik Zakładu Diagnostyki i Monitorowania Procesów. Prowadzi badania z zakresu diagnostyki procesów przemysłowych i systemów mechatronicznych oraz układów sterowania tolerujących uszkodzenia. Kierował pracami badawczymi, w których powstały zaawansowane systemy monitorowania i diagnostyki procesów oraz ich przemysłowe aplikacje. Członek Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk.

e-mail: jmk@mchtr.pw.edu.pl

**Dr inż. Michał SYFERT**

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się badaniami w dziedzinie diagnostyki procesów przemysłowych oraz zastosowań logiki rozmytej. Jest głównym autorem systemu diagnostycznego DIAG oraz jednym z głównych autorów zaawansowanego systemu monitorowania i diagnostyki AMandD oraz platformy programowej inteligentnego systemu diagnostyki i wspomagania sterowania procesów przemysłowych DiaSter.

e-mail: m.syfert@mchtr.pw.edu.pl

**Dr inż. Michał BARTYŚ**

Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z automatyzacją procesów, diagnostyką, systemami sieciowymi automatyki, inteligentnymi urządzeniami pomiarowymi i wykonawczymi oraz zastosowaniami logiki rozmytej. Współautor 3 książek i 3 podręczników, autor 105 publikacji, autor i współautor 4 patentów. Konstruktor 62 unikalnych urządzeń mechatronicznych. Autor licznych wdrożeń przemysłowych.

e-mail: bartyś@mchtr.pw.edu.pl



Keywords: diagnostics, fault isolation, industrial processes, variation of system structure, symptom delays, multiple faults.

1. Wprowadzenie

Diagnostyka złożonych instalacji technologicznych w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, energetycznym jest zadaniem bardzo złożonym. Instalacje takie zawierają setki, a nawet tysiące urządzeń pracujących zwykle w trudnych i zmiennych warunkach, a różnorodność i liczba występujących uszkodzeń jest bardzo duża. Przy bieżącym diagnozowaniu takich instalacji występuje wiele specyficznych uwarunkowań i ograniczeń, które nie odgrywają istotnej roli w diagnostyce urządzeń, maszyn i małych procesów. Wpływają one w decydujący sposób na wybór stosowanych metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń.

W artykule omówiono te uwarunkowania i ograniczenia, określono wymagania stawiane systemom diagnostycznym dla złożonych procesów przemysłowych oraz scharakteryzowano trzy kluczowe problemy, wymagające uwzględnienia przy projektowaniu systemów diagnostycznych: zmienność struktury obiektu w trakcie eksploatacji, opóźnienia powstawania symptomów prowadzące do fałszywych diagnoz oraz występowanie uszkodzeń wielokrotnych. Podano sposoby rozwiązania tych problemów.

2. Uwarunkowania i ograniczenia w diagnostyce procesów przemysłowych

Istnieje wiele uwarunkowań i ograniczeń, które trzeba uwzględnić przy projektowaniu systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych. Do najważniejszych należą:

- **Brak możliwości zakłócania procesu wymuszeniami testowymi.** Diagnostyka musi być realizowana na bieżąco, wyłącznie z wykorzystaniem 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 dotyczą one stanów normalnej pracy obiektu oraz nielicznych zarejestrowanych stanów nienormalnych i awaryjnych. To ogranicza możliwość zastosowania metod klasyfikacji do lokalizacji uszkodzeń. Wymagają one bowiem pozyskania wiedzy o związkach między wartościami symptomów a uszkodzeniami. Do tego celu 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 są najczęściej rozwiązaniami jednostkowymi lub realizowanymi w krótkich seriach, nie ma zatem możliwości wyko-

Streszczenie

W artykule omówiono uwarunkowania i ograniczenia występujące w diagnostyce złożonych instalacji w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, energetycznym itp. Określono wymagania stawiane systemom diagnostycznym dla takich instalacji oraz scharakteryzowano problemy istotne w procesie projektowania systemów diagnostycznych. Do problemów tych zaliczyć należy: zmienność struktury obiektu w trakcie eksploatacji, opóźnienia powstawania symptomów prowadzące do fałszywych diagnoz oraz występowanie uszkodzeń wielokrotnych. Podano sposoby rozwiązania tych problemów. Zostały one zastosowane przy realizacji systemów modelowania, diagnostyki i nadrzędnego sterowania procesów AMandD oraz DiaSter.

Słowa kluczowe: diagnostyka, lokalizacja uszkodzeń, procesy przemysłowe, zmienność struktury systemu, opóźnienia symptomów, uszkodzenia wielokrotne.

Diagnostics of complex industrial systems- limitations, requirements, problems**Abstract**

Limitations, requirements and problems of diagnostics of complex industrial systems is discussed in this paper. Brief discussion given in Section 1 is particularly relevant to issues typical for chemical, petrochemical, power, food etc. large scale industrial installations. Section 2 of the paper lists and discusses main limitations and restrictions that should be taken into account in design phase of industrial diagnostic system. Basic issues are connected with variations in the diagnosed system structure, delays of fault symptoms causing false diagnoses, and necessity of isolation of multiple faults. Three applicable approaches of solving the issues stated in Section 2 are described in Section 3. Here, in Subsection 3.1, a novel and robust inference scheme against system structure variation is proposed (2) and Dynamic Decomposition of the Diagnosed System is briefly described. The problems of generation of false diagnoses caused by delays of fault symptoms are discussed in Subsection 3.2. As a remedy, a simple and robust algorithm on fault delays is presented. The discussion of applicable approach allowing handling multiple faults [9] is given in Subsection 3.3. The industrial pilot applications with use of advanced diagnostic and monitoring systems AMandD [16] and DiaSter [19] are presented in the summary part (Section 4). These systems make use, among others, from approaches presented in this paper.

rzystania wiedzy z obiektów tego samego typu. System diagnostyczny powinien natomiast wykrywać i rozpoznawać groźne awarie, dla których brak jest danych, w tym także potencjalnie możliwe 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 teoretyczne metody rozpoznawania uszkodzeń, wykorzystujące takie opisy (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 wykorzystywać wiedzę technologów, operatorów procesu lub służb utrzymania ruchu.
- **Trudności pozyskania modeli obiektów 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 aproksymowane, które z odpowiednią dokładnością odwzorowują tylko wybrane właściwości 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 tworzony.
- **Niepewności symptomów.** W praktyce mamy do czynienia niemal wyłącznie z sygnałami niepewnymi. Pomiar wartości wielkości procesowych obarczone są zakłóceniami i szumem pomiarowym. Niepewne są także modele procesu. W rezultacie symptomy wykrywane na podstawie modeli z wykorzystaniem danych pomiarowych są także niepewne. Konieczne jest zatem zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania informacji niepewnych, np. logiki rozmytej.
- **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 [1]. Z tego względu systemy diagnostyczne powinny posiadać zdolność integracji różnorodnych metod detekcji uszkodzeń. Ponadto w czasie eksploatacji systemu wzrasta poziom wiedzy o diagnozowanym procesie. 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 [1, 2, 3, 4, 5]. Najprostszym wskaźnikiem wykrywalności uszkodzeń jest stosunek liczby uszkodzeń wykrywanych przez system diagnostyczny do liczby wszystkich uszkodzeń rozpoznawanych w obiekcie. Powszechnie wymaga się, aby wszystkie uszkodzenia były wykrywalne, zatem wartość tego wskaźnika powinna wynosić 1.

Rozróżnialność uszkodzeń uzyskujemy wtedy, gdy sygnatyry poszczególnych uszkodzeń są różne [1, 3, 6]. Oznacza to, że każde z uszkodzeń powoduje wystąpienie innego podzbioru wartości sygnałów diagnostycznych niż pozostałe. Im większa rozróżnialność uszkodzeń, tym większa dokładność diagnoz. Dokładność jest określona jako odwrotność średniej liczby uszkodzeń wskazywanych w diagnozach [1].

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 on-line procesów przemysłowych należą do nich:

- zmiany struktury diagnozowanego procesu [1, 7, 8], w tym:
 - zmiany zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych, powodujące także zmiany możliwych do wykorzystania algorytmów detekcyjnych (testów),
 - zmiany zbioru diagnozowanych urządzeń, a tym samym zbioru rozpatrywanych uszkodzeń,
- opóźnienia powstawania symptomów [8],
- uszkodzenia wielokrotne [9],
- niepewności symptomów i możliwość pojawiania się nieznanych stanów systemu, np. uszkodzeń pominiętych na etapie projektowania systemu [10].

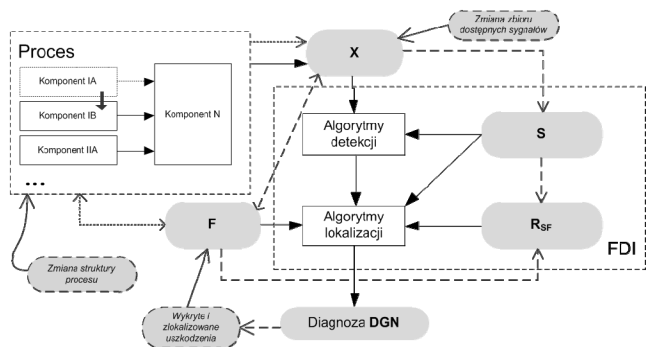
Odporny system diagnostyczny [11] charakteryzuje się zatem zdolnością formułowania prawdziwych diagnoz pomimo występowania przyczyn zakłócających proces wnioskowania diagnostycznego.

Poniżej scharakteryzowano trzy pierwsze z wymienionych powyżej problemów diagnozowania złożonych procesów przemysłowych oraz krótko omówiono metody ich rozwiązania.

3.1. Zmienność struktury obiektu

W fazie projektowania systemu diagnostycznego określane są zbiory: \bar{X} – zmiennych procesowych (sygnałów mierzonych Y i sterujących U) wykorzystywanych w algorytmach detekcyjnych, sygnałów diagnostycznych \bar{S} generowanych przez te algorytmy oraz – uszkodzeń \bar{F} . Związek \bar{R}_{SF} 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 praktyce system diagnostyczny operuje nie na pełnych zbiorach: $\bar{X}, \bar{S}, \bar{F}, \bar{R}_{XS}, \bar{R}_{SF}$ lecz na ich podzbiorach: X, S, F, R_{XS}, R_{SF} , które są dynamicznie modyfikowane w trakcie funkcjonowania systemu diagnostycznego. Ilustruje to rys. 1. Wynika to ze zmienności struktury obiektu diagnozowania i konieczności adaptacji systemu diagnostycznego do tych zmian.

W trakcie eksploatacji mają miejsce zmiany struktury procesów przemysłowych. Niektóre aparaty technologiczne mogą być czasowo wyłączane. Powoduje to usunięcie ze zbioru rozpatrywanych uszkodzeń \bar{F} oraz zbioru zmiennych procesowych \bar{X} tych elementów, które są związane z wyłączanymi aparatami. Podobnie urządzenia pomiarowe mogą być chwilowo odłączone dla realizacji remontów, sprawdzenia, wzorcowania lub modyfikacji parametrów. Urządzenia te ponadto ulegają uszkodzeniom. Oznacza to zmiany zbioru dostępnych zmiennych procesowych X oraz kolejną redukcję ze zbioru \bar{F} uszkodzeń torów pomiarowych, które zostały odłączone. Zmienność zbioru realizowanych algorytmów diagnostycznych, a zatem zbioru wyliczanych sygnałów diagnostycznych S wynika 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 zdadności danej części obiektu.



Rys. 1. Schemat diagnozowania z zaznaczonymi zbiorami podlegającymi zmianom w trakcie eksploatacji systemu

Fig. 1. Block schematics of the diagnostics. The sets being changed during exploitation phase are pointed out

W konsekwencji wyżej wspomnianych operacji konieczna jest adaptacja systemu diagnostycznego przez odpowiednią redukcję zbiorów \bar{X} , \bar{S} , \bar{F} oraz relacji \bar{R}_{XS} i \bar{R}_{SF} do odpowiednich podzbiorów X, S, F, R_{XS}, R_{SF} bezpośrednio wykorzystywanych w procesie bieżącego wnioskowania co do stanu procesu.

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. Systemy diagnostyczne dla procesów przemysłowych muszą ten problem uwzględniać i skutecznie rozwiązywać.

Dla osiągnięcia wymaganej odporności istotne znaczenie ma zapis związku między uszkodzeniami, a wartościami sygnałów diagnostycznych. Funkcje logiczne, drzewa diagnozowania, binarna macierz diagnostyczna, system informacyjny [1] określane na etapie projektowania systemu diagnostycznego są sztywne i nie są odporne na zmiany struktury obiektu. Również w regułach typu:

$$if(s_1 = v_{1,k}) \dots \wedge (s_j = v_{j,k}) \dots \wedge (s_l = v_{l,k}) \dots then(f_k, v_j \in \{0,1\}) \quad (1)$$

przy zmianach zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych, zmianom ulega zbiór przesłanek. Ponadto w przypadku systemów złożonych reguły o takiej postaci są niedogodne, gdyż zawierają bardzo dużą liczbę przesłanek.

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

$$if(s_j = v) then(f_k \vee f_n \dots \vee f_r), \quad (2)$$

w których poszczególnym symptomom przyporządkowane są podzbiory uszkodzeń wywołujących te symptomy. 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 w przypadku rozszerzaniu bazy reguł przez wprowadzanie nowych testów.

Skuteczną metodą umożliwiającą łatwą adaptację systemu wnioskowania do omówionych zmian jest zasada dynamicznej dekompozycji obiektu (DDS–Dynamic Decomposition of Diagnosed System) [9]. 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 :

$$F^1 = F(s_x = v), \quad (3)$$

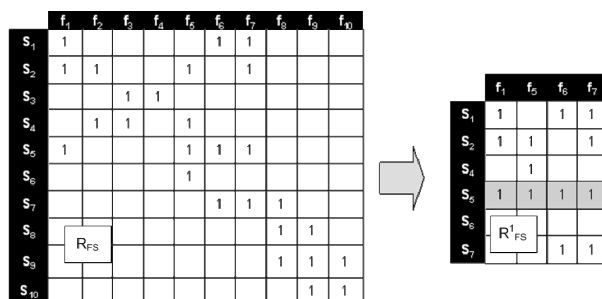
gdzie $F(s_x=v)$ oznacza podzbiór uszkodzeń powodujących pojawienie się symptomu $s_x=v$ zgodnie z relacją diagnostyczną \bar{R}_{SF} . Obejmuje on wszystkie uszkodzenia wskazane w konkluzji tej

reguły. Następnie wybierane są 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 :

$$S^1 = \{s_j \in S: F^1 \cap F(s_j = v) \neq \emptyset\}, \quad (4)$$

który zostanie wykorzystany do sformułowania diagnozy.

Powyższe podejście może zostać zilustrowane jako wydzielenie odpowiedniego podzbioru relacji diagnostycznej na podstawie pierwszego zaobserwowanego symptomu. Na rys. 2 pokazano przykład wyznaczenia podsystemu relacji diagnostycznej zainicjowanego powstaniem symptomu $s_5=l$.



Rys. 2. Sposób określenia podsystemu relacji diagnostycznej zainicjowanego powstaniem symptomu

Fig. 2. Illustration of the method for separation of the diagnostic relation subsystem as the result of appearing a new fault symptom

Wnioskowanie w wydzielonym podsystemie stanowi samodzielny problem (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 przywróceniu i rozpoznaniu stanu zdadności uszkodzonego elementu.

Równolegle może być prowadzonych wiele wątków wnioskowania. Odpowiada to rozpoznawaniu uszkodzeń wielokrotnych, występujących w bardzo małych odstępach czasu. Warunkiem prawidłowego wnioskowania prowadzonego przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, z zastosowaniem dynamicznej dekompozycji obiektu, jest rozłączność podzbiorów sygnałów diagnostycznych wykorzystywanych w poszczególnych wątkach [9]. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to musi być zastosowany algorytm wnioskowania dla uszkodzeń wielokrotnych. Algorytmy takie zostały podane w pracach [1, 7, 9].

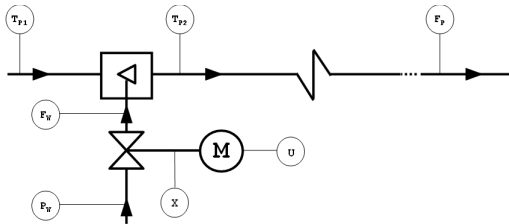
3.2. Opóźnienia powstawania symptomów

Do diagnozowania niezbędna jest znajomość odwzorowania przestrzeni wartości sygnałów diagnostycznych w przestrzeń uszkodzeń. 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 w różnym czasie przez różne sygnały diagnostyczne. Jeśli znane są równania residuów w postaci wewnętrznej, to istnieje możliwość określenia sekwencji symptomów dla poszczególnych uszkodzeń, a także projektowania residuów wtórnych, w taki sposób, aby uzyskać różne sekwencje symptomów dla wszystkich uszkodzeń. Można stosować także przybliżony opis, określając przedział minimalnego i maksymalnego opóźnienia symptomów dla poszczególnych uszkodzeń [12]. Uwzględnienie opóźnień powstawania symptomów umożliwia zwiększenie rozóżnialności uszkodzeń oraz w wielu przypadkach skrócenie czasu diagnozowania.

W przypadku procesów przemysłowych pozyskanie równań residuów w postaci wewnętrznej jest zwykle niemożliwe, ze względu na trudności precyzyjnego opisu wielu zjawisk, a także olbrzymie koszty modelowania. Dlatego stosowane są statyczne odwzorowania wartości sygnałów diagnostycznych w przestrzeni uszkodzeń. Nieuwzględnienie opóźnień powstawania symptomów może jednak prowadzić do generowania fałszywych diagnoz.

Aby uniknąć tego problemu stosowany jest algorytm wnioskowania „tylko na podstawie obserwowanych symptomów” [13], który zabezpiecza przed błędami wnioskowania, wynikającymi z niejednakowych opóźnień powstawania symptomów. W algorytmie tym brane są pod uwagę 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. Algorytm ten może być jednak ulepszony, przez uwzględnienie relacji między czasami powstawania symptomów. Relacja między opóźnieniami $\theta_{k,j}$ i $\theta_{k,m}$ powstawania dwóch różnych symptomów tego samego k -tego uszkodzenia może zostać określona na podstawie znajomości obiektu oraz algorytmów detekcyjnych. Zostanie to zilustrowane na przykładzie fragmentu ciągu parowego kotła bloku energetycznego (rys. 3), zawierającego schładzacz pary z zaworem wody wtryskowej. Załóżmy, że do diagnostyki tego obiektu stosowane są następujące residua:

$$r_1 = X - \tilde{X}(U), \quad r_2 = F - \tilde{F}(X, P_w), \quad r_3 = F - \tilde{F}(U, P_w) \\ r_4 = T_{p2} - \tilde{T}_{p2}(T_{p1}, F_p, F_w), \quad r_5 = T_{p2} - \tilde{T}_{p2}(T_{p1}, F_p, U, P_w).$$



Rys. 3. Zespół schładzacza pary z zaworem wody wtryskowej (oznaczenia: U – sygnał sterujący, X – położenie tłoczyska siłownika, P_w – ciśnienie wody wtryskowej, F_w – strumień przepływu, T_{p1} , T_{p2} – temperatura pary przed i za schładzaczem, F_p – strumień przepływu pary

Fig. 3. Attemperator assembly for the boiler steam-water line with injection water control valve. Denotations: U – control value, X – hydraulic cylinder stem displacement, P_w – injection water pressure, F_w – water flow rate, T_{p1} , T_{p2} – steam temperature before and after attemperator assembly, F_p – steam flow rate.

Residua r_2 , r_3 , r_4 , r_5 są wrażliwe na uszkodzenie zaworu regulacyjnego. Uszkodzenie to spowoduje natychmiastową zmianę przepływu wody F_w , a po pewnej chwili także zmianę temperatury pary T_{p2} . Słuszne są zatem następujące relacje opóźnień symptomów dla tego, oznaczonego indeksem k , uszkodzenia: $\theta_{k,2} < \theta_{k,4}$, $\theta_{k,2} < \theta_{k,3}$, $\theta_{k,3} < \theta_{k,4}$. Analogicznie, oznaczając przez m uszkodzenie siłownika, możemy zapisać: $\theta_{m,2} < \theta_{m,3} < \theta_{m,5}$. Wiedzę o relacjach między opóźnieniami symptomów można uzyskać także na podstawie analizy grafu przyczynowo - skutkowego procesu, stanowiącego model jakościowy procesu [14].

Poniżej przedstawiono prosty algorytm wnioskowania diagnostycznego, stanowiący rozszerzenie i ulepszenie algorytmu wnioskowania na podstawie symptomów. Rozszerzenia związane są z wykorzystaniem wiedzy o znanych relacjach między opóźnieniami symptomów. Zakłada się przy tym, że wiedza ta nie musi być kompletna i ma postać następujących relacji: $\theta_{k,j} < \theta_{k,m}$.

W przypadku szeregowego wnioskowania diagnostycznego i stosowaniu wielowartościowej oceny residuów stosowane są następujące reguły [1, 6]:

- 1) Jeśli wartość sygnału diagnostycznego s_j jest równa zero, to nie wystąpiło żadne z uszkodzeń wykrywanych przez ten sygnał, tj. należących do podzbioru $F(s_j)$.
- 2) Jeśli wartość sygnału diagnostycznego s_j jest równa 1, to wystąpiło uszkodzenie lub podzbiór uszkodzeń ze zbioru $F(s_j = v)$.

W przypadku wnioskowania na podstawie symptomów wykorzystywana jest jedynie reguła 2. Reguła 1 nie może być stosowana, ze względu na brak wiedzy o opóźnieniach symptomów. W proponowanym algorytmie wykorzystywane są obie reguły. Zakładamy dla uproszczenia występowanie uszkodzeń pojedynczych. Proces lokalizacji uszkodzenia rozpoczyna się w chwili t^l , po zaobserwowaniu pierwszego symptomu. Wystąpienie symptomu oznacza powstanie jednego z uszkodzeń ze zbioru $F(s_x = v)$, na które wrażliwy jest dany sygnał diagnostyczny s_x . Ten podzbiór możliwych uszkodzeń tworzy pierwotną diagnozę DGN_1 , która będzie uściślana w kolejnych krokach:

$$(t = t^1) \cap (s_x = v \neq 0) \Rightarrow \\ DGN_1 \equiv F^1 = F(s_x = v) \quad (5)$$

Podzbiór sygnałów diagnostycznych S^l przydatnych do lokalizacji uszkodzeń ze zbioru F^l tworzony jest według zależności:

$$S^l = \{s_j \in S : [F^l \cap F(s_j = v) \neq \emptyset]\}. \quad (6)$$

Dalsza redukcja następuje na podstawie analizy znanych relacji między opóźnieniami symptomów. Analizowane są opóźnienia dla uszkodzeń $f_k \in F^l$ oraz sygnałów diagnostycznych $s_j \in S^l$. Jeśli dla danego uszkodzenia $f_k \in F^l$ istnieje sygnał $s_j \in S^l$, którego opóźnienie $\theta_{k,j}$ jest mniejsze niż opóźnienie $\theta_{k,x}$ sygnału inicjującego proces lokalizacji uszkodzeń: $\theta_{k,j} < \theta_{k,x}$, to uszkodzenie takie jest uznawane za nieistniejące i nowa dokładniejsza diagnoza przyjmuje postać:

$$DGN_p = DGN_{p-1} - f_k. \quad (7)$$

Po zaobserwowaniu kolejnego symptomu s_r przeprowadzana jest redukcja zbioru możliwych uszkodzeń w dwóch etapach. Początkowo, ze względu na założenie uszkodzeń pojedynczych, redukcja przebiega wg wzoru:

$$s_r \in S^1 \wedge s_r \neq 0 \Rightarrow DGN_p = DGN_{p-1} \cap F(s_j = v). \quad (8)$$

Następnie stosowana jest analiza opóźnień dla uszkodzeń dla $s_j \in S^l$ oraz $f_m \in DGN_p$, analogicznie jak opisano wyżej wg zależności (7).

Przedstawiony algorytm zabezpiecza przed błędami diagnozowania związanymi z opóźnieniami powstawania symptomów, a także pozwala zwiększyć rozróżnialność uszkodzeń w stosunku do algorytmu wnioskowania „tylko na podstawie symptomów”. Wzrost rozróżnialności jest tym większy im pełniejsza jest wiedza o relacjach między opóźnieniami symptomów. Algorytm ten wykazał przydatność praktyczną w diagnostyce złożonych instalacji technologicznych w przemyśle chemicznym.

3.3. Uszkodzenia wielokrotne

W przypadku złożonych instalacji przemysłowych, ze względu na dużą liczbę urządzeń i ograniczoną ich niezawodność, uszkodzenia wielokrotne mogą stanowić poważny problem. Uszkodzenia wielokrotne mogą powstawać kolejno lub jednocześnie. Najtrudniejsze do rozpoznania są uszkodzenia jednoczesne. Może się wydawać, że w praktyce sytuacja taka występuje bardzo rzadko, jeśli rozpatrujemy uszkodzenia niezależne. Okazuje się jednak, że problem ten pojawia się przy każdym uruchomieniu systemu diagnozującego dużą instalację technologiczną. W chwili rozpoczęcia pracy, wszystkie wcześniej powstałe uszkodzenia są traktowane jako uszkodzenia jednoczesne. Brak mechanizmu rozpoznawania takich uszkodzeń może doprowadzić do nieprawidłowego funkcjonowania systemu diagnostycznego.

W pracach [1, 9, 13, 16] wykazano, że zarówno uszkodzenia pojedyncze jak też większość uszkodzeń wielokrotnych może być skutecznie zlokalizowana przy założeniu uszkodzeń pojedynczych pod warunkiem, że algorytm wnioskowania diagnostycznego wykorzystuje metodę DDS. Jest to istotne, gdyż założenie uszkodzeń pojedynczych powoduje znaczne uproszczenie algorytmu lokalizacji uszkodzeń. Jeśli uszkodzenia występują kolejno w odstępach większych, niż czas formułowania kolejnych dia-

gnoz, 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 zdadności uszkodzonego elementu.

Wykorzystanie metody DDS jest niezwykle użyteczne przy rozpoznawaniu uszkodzeń wielokrotnych. 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: $S^1 \cap S^2 = \emptyset$ (w konsekwencji rozłączne są także podzbiory uszkodzeń: $F^1 \cap F^2 = \emptyset$). Oznacza to, że w praktyce prowadzone mogą być równoległe odrębne wątki wnioskowania związane z lokalizacją uszkodzeń w każdym z dynamicznie wyodrębnionych podsystemów.

Jeśli warunek rozłączności podzbiorów testów w wydzielonych podsystemach nie jest spełniony, czyli $S^1 \cap S^2 \neq \emptyset$, to proces wnioskowania powinien być prowadzony, przy założeniu uszkodzeń podwójnych lub ogólnie uszkodzeń wielokrotnych. Do sformułowania diagnozy wykorzystywany jest podzbiór sygnałów diagnostycznych $S^1 \cap S^2$.

Diagnoza jest sformułowana wg następującej prostej zależności:

$$DGN = \bigcup_{j:s_j \neq 0} F(s_j) - \bigcup_{j:s_j = 0} F(s_j). \quad (9)$$

Algorytm pozwalający na wskazanie jakie są możliwe kombinacje uszkodzeń wielokrotnych podano w [9]. Powyższe podejście jest bardzo efektywne, ponieważ redukuje w bardzo istotny sposób (nawet kilkudziesięciokrotnie) liczbę rozpatrywanych stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi.

4. Podsumowanie

W artykule omówiono istotne uwarunkowania i ograniczenia występujące w diagnostyce złożonych instalacji przemysłowych. Określono wymagania stawiane systemom diagnostycznym dla takich obiektów. Omówiono istotne problemy projektowania algorytmów diagnostycznych dla procesów przemysłowych: zmienność struktury obiektu w trakcie eksploatacji, opóźnienia powstawania symptomów oraz występowanie uszkodzeń wielokrotnych. Podano metody rozwiązania tych problemów. Zostały one zastosowane przy realizacji systemów AMandD i DiaSter przeznaczonych do modelowania, diagnostyki i nadrzędnego sterowania procesów. Ich zadaniem jest wczesne i dokładne rozpoznawanie nieprawidłowych stanów procesu przemysłowego oraz uszkodzeń urządzeń technologicznych, wykonawczych i pomiarowych.

System AmandD [16] został opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Został on pilotowo wdrożony do diagnozowania: instalacji generatora pary w laboratorium Uniwersytetu w Lille, części instalacji w zakładzie produkcji mocznika w Zakładach Azotowych Puławy i do realizacji zadań diagnostyki w stacji wyparnej w Cukrowni Lublin [17]. Przeprowadzone zostały także pilotażowe testy systemu AMandD w PKN ORLEN na instalacji hydroodsierczania gudronu [18]. Zadaniem systemu są: wczesne wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń urządzeń pomiarowych i wykonawczych w obrębie pieca H302 oraz kolumny destylacji próżniowej C303. Odrębnym zadaniem systemu jest monitorowanie stopnia zakoksowania aparatów technologicznych pieca oraz kolumny destylacji próżniowej w celu realizacji strategii utrzymania ruchu na podstawie bieżącej oceny stanu technicznego instalacji.

DiaSter [19] stanowi nową, rozszerzoną funkcjonalnie i programowo wersję systemu AMandD. Był on rozwijany przez zespół badawczy, w skład którego wchodziłi specjaliści z Politechniki Warszawskiej, Politechniki Śląskiej, Politechniki Rzeszowskiej oraz Uniwersytetu Zielonogórskiego. Głównym zadaniem systemu DiaSter jest realizacja zaawansowanych funkcji modelowania procesów, sterowania nadrzędnego, optymalizacji oraz diagnostyki procesów przemysłowych. System wyposażony jest w zaawansowane narzędzia do modelowania obiektów niezbed-

nych 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. System zawiera (podobnie jak AMandD) implementację szerokiej gamy najnowszych algorytmów z zakresu obliczeń inteligentnych. DiaSter ze względu na otwartą architekturę umożliwia połączenie z praktycznie dowolnym systemem automatyki.

5. Literatura

- [1] Kościelny J.M. (2001). Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- [2] Chen J., Patton R. (1999). Robust model based fault diagnosis for dynamic systems. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [3] Gertler J. (1998). Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
- [4] Isermann R. (2006). Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. New York: Springer-Verlag.
- [5] Patton R., Frank P., Clark R. (Eds.) (2000). Issues of fault diagnosis for dynamic systems. Springer.
- [6] Korbicz J., Kościelny J.M. Kowalczyk Z., Cholewa W (Eds). (2004). Fault Diagnosis: Models, artificial intelligence methods, applications. Springer.
- [7] Kościelny J.M. (1995). Fault Isolation in Industrial Processes by Dynamic Table of States Method. Automatica, 31(5), 747-753.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Kościelny J.M., Syfert M., Dziembowski B. (2007): The issue of symptoms arising delay during diagnostic reasoning. 5th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Grenoble, France, (CD),
- [13] Kościelny J.M., Syfert M. (2007). The issue of symptom based diagnostic reasoning. W: Recent Advances in Mechatronics. (Eds. Jabłoński R., Turkowski M., Szewczyk R.) Springer, 167-171.
- [14] Syfert M. (2009). A modified algorithm of fault isolation in decentralised structures. W Diagnostic of Processes and Systems, Ed. Z. Kowalczyk, Control and Computer Science: Information Technology, Control Theory, Fault and System Diagnosis, PWNT, Gdańsk 2009, pp. 229-236.
- [15] Kościelny J.M., Bartyś M., Syfert M. (2007). Problemy praktyczne lokalizacji uszkodzeń w złożonych systemach przemysłowych. W: Inteligentne wydobywanie informacji w celach diagnostycznych. (Red. Kowalczyk Z., Wiszniewski B.) PWNT, Gdańsk, 167-185.
- [16] 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, Elsevier, 1, 635-640.
- [17] Syfert M. Rzepiejewski P., Wnuk P., Kościelny J. M. (2005). Current diagnostics of the evaporation station. 16th IFAC World Congress, Praga.
- [18] 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, 55, nr 3/2009, 136-140.
- [19] Korbicz J., Kościelny J.M. (red.). (2009). Modelowanie diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter. WNT, Warszawa.