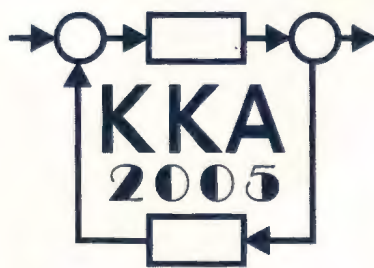


XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II



**Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk**

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-01-4

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

TECHNIKA SYSTEMÓW – DIAGNOSTYKA

PROBLEM USZKODZEŃ WIELOKROTNYCH W DIAGNOSTYCE PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Jan Maciej KOŚCIELNY, Michał BARTYŚ

Politechnika Warszawska, Instytut Automatyki i Robotyki

ul. św. A. Boboli 8, 02-525, Warszawa, e-mail: jmk@mchtr.pw.edu.pl; bartys@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie: W referacie rozważane są zagadnienia bieżącego diagnozowania procesów przemysłowych związane z uszkodzeniami wielokrotnymi. Przeprowadzono analizę możliwości rozpoznawania takich uszkodzeń, przy wnioskowaniu prowadzonym przy założeniu uszkodzeń pojedynczych. Podano algorytmy rozpoznawania stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi. Przedyskutowano wpływ diagnozowania prowadzonego w strukturach zdecentralizowanych na możliwość rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych.

Słowa kluczowe: Lokalizacja uszkodzeń, uszkodzenia wielokrotne, procesy przemysłowe, diagnostyka w strukturach zdecentralizowanych

1. WPROWADZENIE

Większość znanych metod diagnozowania opracowana została przy założeniu występowania uszkodzeń pojedynczych [1, 5, 12]. Założenie takie powoduje znaczne uproszczenie algorytmu lokalizacji uszkodzeń. Może być zatem z powodzeniem stosowane dla obiektów składających się ze stosunkowo niedużej liczby elementów, ponieważ prawdopodobieństwo występowania uszkodzeń pojedynczych jest znacznie większe niż uszkodzeń wielokrotnych. Jednak w przypadku złożonych instalacji przemysłowych, ze względu na dużą liczbę urządzeń i ograniczoną ich niezawodność, uszkodzenia wielokrotne mogą stanowić poważny problem. Stany z uszkodzeniami wielokrotnymi mogą pojawiać się stopniowo, w wyniku sekwencji powstawania kolejnych uszkodzeń lub nagle. Najgroźniejsze i najtrudniejsze do rozpoznania są uszkodzenia występujące niemal jednocześnie. Zagadnienia rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych rozważane były w literaturze stosunkowo rzadko. W pracach [2, 4] analizowano przypadek diagnostyki uszkodzeń wielokrotnych urządzeń pomiarowych i wykonawczych z zastosowaniem banku obserwatorów. Zakładano przy tym, że innego rodzaju uszkodzenia nie występują. Do lokalizacji uszkodzeń obiektów złożonych stosowana jest powszechnie binarna macierz diagnostyczna. Sposób tworzenia macierzy binarnych dla uszkodzeń wielokrotnych podany został m. in. w pracach: [5,6,7]. Dla obiektów liniowych znane są metody odprężania zakłóceń i uszkodzeń pozwalające kształtować wrażli-

wość residuów na uszkodzenia [4, 5]. Dąży się do uzyskania diagonalnej macierzy diagnostycznej. Taka postać tej macierzy jest optymalna, gdyż zapewnia, że na każde uszkodzenie wrażliwe jest tylko jedno residuum. Każda wartość residuum odbiegająca od zera wskazuje zatem na istnienie innego uszkodzenia. Problem uszkodzeń wielokrotnych jest w ten sposób rozwiązywany. Jednak diagonalną macierz diagnostyczną można uzyskać jedynie w przypadku, gdy liczba uszkodzeń nie przekracza liczby wyjść obiektu [5]. W rzeczywistości liczba wyjść obiektu jest równa liczbie uszkodzeń urządzeń pomiarowych. Jeśli uwzględnia się wszystkie uszkodzenia, tzn. uszkodzenia urządzeń pomiarowych, wykonawczych oraz komponentów instalacji technologicznej, to liczba uszkodzeń jest zawsze większa niż liczba wyjść obiektu. Zatem to podejście nie jest przydatne w praktyce przemysłowej. Teoria Reitera [13] pozwala na wskazanie nie tylko uszkodzeń pojedynczych ale także wielokrotnych [3]. Diagnozy są generowane jako minimalne zbiory przecięć (hitting sets) wszystkich minimalnych zbiorów konfliktowych. To podejście zostanie porównane z proponowanym w niniejszym referacie. Algorytm bieżącej diagnostyki złożonych instalacji technologicznych (metoda DTS) umożliwiający rozpoznawanie uszkodzeń pojedynczych i wielokrotnych został przedstawiony w publikacjach [6, 7, 9]. W pracy [14] do rozpoznawania sygnatur uszkodzeń pojedynczych i wielokrotnych zastosowano metodę bazującą na odległościach Hamminga.

Ogólnie można jednak stwierdzić, że w zakresie diagnostyki uszkodzeń wielokrotnych istnieje jeszcze wiele problemów do rozwiązania. W niniejszym referacie podjęto próbę znalezienia odpowiedzi na następujące pytania:

- Czy można w sposób pewny określić sygnatury stanów obiektu z uszkodzeniami wielokrotnymi na podstawie sygnatur stanów z uszkodzeniami pojedynczymi?
- Czy i ewentualnie, w jakich przypadkach diagnozowanie obiektów przy założeniu uszkodzeń pojedynczych pozwala prawidłowo rozpoznawać uszkodzenia wielokrotne?

- Czy konieczne jest przeszukiwanie przestrzeni stanów obiektu z uszkodzeniami wielokrotnymi, aby sformułować diagnozę o wystąpieniu takich stanów?
- W jaki sposób podczas wnioskowania ograniczyć liczbę rozpatrywanych stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi?
- Jaki wpływ na rozpoznawanie uszkodzeń wielokrotnych ma diagnozowanie w strukturach zdecentralizowanych?

Zagadnienia te będą rozważane poniżej, przy założeniu binarnej oceny wartości residuów..

2. ZASADY LOKALIZACJI USZKODZEŃ PRZY ZAŁOŻENIU USZKODZEŃ POJEDYŃCZYCH I WIELOKROTNYCH

2.1. Uszkodzenia a stany obiektu diagnozowania

Dla każdego obiektu diagnozowania można określić zbiór możliwych uszkodzeń - F , rozumianych jako zdarzenia destrukcyjne powodujące pogorszenie jakości działania obiektu lub jego części:

$$F = \{f_k : k = 1, 2, \dots, K\} \quad (1)$$

Uszkodzenia powinny być wykrywane w procesie diagnozowania. Każdemu elementowi f_k zbioru uszkodzeń F odpowiada stan $z(f_k)$ zdefiniowany w następujący sposób:

$$z(f_k) = \begin{cases} 0 - \text{stan bez uszkodzenia } f_k \\ 1 - \text{stan z uszkodzeniem } f_k \end{cases} \quad (2)$$

Zbiór istniejących uszkodzeń oznaczony zostanie następująco:

$$F(1) = \{f_k \in F : z(f_k) = 1\} \quad (3)$$

Przyjmujemy, że stan obiektu diagnozowania jest określony przez stany jego wszystkich uszkodzeń ze zbioru F :

$$z = \{z(f_1), z(f_2), \dots, z(f_K)\} \quad (4)$$

Zbiór Z wszystkich stanów z_i obiektu diagnozowania:

$$Z = \{z_i : i = 0, 1, \dots, I\}, \quad I = 2^K \quad (5)$$

może być wyrażony jako suma podzbiorów stanów z liczbą uszkodzeń m od 0 do K :

$$Z = \bigcup_{m=0}^K Z_{(m)}, \quad (6)$$

gdzie:

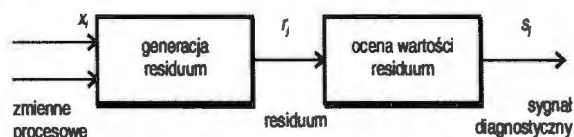
$$Z_{(m)} = \left\{ z_i \in Z : \sum_{k=1}^K z(f_k) = m \right\} \quad (7)$$

jest podzbiorem stanów obiektu, w których występuje jednocześnie m uszkodzeń. Stan z_i obiektu diagnozowania może być jednoznacznie opisany za pomocą zbioru $F(1)_i$ uszkodzeń występujących w tym stanie.

Liczba wszystkich stanów obiektów $I=2^K$ dla obiektów złożonych jest ogromna. Przykładowo dla stacji wyparnej cukrowni $K>200$, a dla całej cukrowni, K jest rzędu kilku do kilkunastu tysięcy. Rozpatrywanie w czasie rzeczywistym wszystkich stanów w liczbie I przekracza zatem możliwości współczesnych komputerów.

2.2. Sygnatury uszkodzeń i stanów obiektu

Dla celów lokalizacji uszkodzeń wykorzystywany jest zbiór algorytmów detekcyjnych, tzw. testów diagnostycznych. Każdy test diagnostyczny generuje na wyjściu sygnał diagnostyczny s_j informujący o wyniku kontroli (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy testu diagnostycznego bazującego na modelu

W wyniku realizacji wszystkich testów uzyskiwany jest zbiór sygnałów diagnostycznych S :

$$S = \{s_j : j = 1, 2, \dots, J\}. \quad (8)$$

Do zapisu relacji uszkodzenia-symptomy:

$$R_{FS} \subset F \times S. \quad (9)$$

stosowana jest najczęściej binarna macierz diagnostyczna [5, 7]. Element macierzy zdefiniowany jest następująco:

$$r(f_k, s_j) = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow \langle f_k, s_j \rangle \notin R_{FS} \\ 1 \Leftrightarrow \langle f_k, s_j \rangle \in R_{FS} \end{cases} \quad (10)$$

Przyjmuje on wartość 1 jeśli uszkodzenie f_k jest wykrywane przez sygnał diagnostyczny s_j .

Kolumny macierzy diagnostycznej stanowią sygnatury poszczególnych uszkodzeń. Określają one wzorcowe wartości sygnałów diagnostycznych w przypadku wystąpienia pojedynczych uszkodzeń:

$$z = \{z(f_1), z(f_2), \dots, z(f_K)\} \quad (11)$$

Wzorcowe wartości sygnałów diagnostycznych we wszystkich stanach obiektu określa tablica stanów. Pełna tablica stanów zawiera wartości sygnałów diagnostycznych w stanie pełnej zdatności, w stanach z uszkodzeniami pojedynczymi, w stanach z uszkodzeniami podwójnymi, itd. aż do stanu ze wszystkimi możliwymi uszkodzeniami. Część tablicy odpowiadająca stanom z uszkodzeniami pojedynczymi jest identyczna z binarną macierzą diagnostyczną.

Wzorcowe wartości sygnałów diagnostycznych w kolumnie tablicy stanów są sygnaturą danego stanu obiektu.

$$z = \{z(f_1), z(f_2), \dots, z(f_K)\} \quad (12)$$

Jeśli sygnatury stanów są identyczne to stany są nierozróżnialne. Sygnatury stanów są tworzone na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej. Powszechnie przyjmuje się [5, 6, 7, 9, 14], że każdy element sygnatury stanu jest alternatywą wartości wzorcowych dla wszystkich uszkodzeń istniejących w tym stanie:

$$v(z_i, s_j) \equiv v_{ij} = \bigcup_{k: f_k \in F(1)_i} r_{jk} \quad (13)$$

Pojawia się pytanie, czy takie założenie jest w pełni uzasadnione? Czy można w sposób pewny określić sygnatury stanów obiektu z uszkodzeniami wielokrotnymi na podstawie sygnatur stanów z uszkodzeniami pojedynczymi? Można podać wiele przykładów, w których wpływ uszkodzeń na wartość residuum może

się wzajemnie kompensować. Wzór (13) jest zatem nie zawsze słuszny. Nie gwarantuje on poprawności wyznaczenia sygnałów wzorcowych dla stanów z uszkodzeniami wykrywanymi przez jeden test.

2.3. Formułowanie diagnoz przy założeniu uszkodzeń pojedynczych i wielokrotnych

W przypadku diagnostyki prowadzonej przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, diagnoza wskazuje te uszkodzenia, których sygnatury są zgodne z uzyskanymi wartościami sygnałów diagnostycznych:

$$DGN(F) = \{f_k \in F : \forall_{j \in S} s_j = r(f_k, s_j)\} \quad (14)$$

Uszkodzenia te są nierozróżnialne, gdyż odpowiadające im sygnatury uszkodzeń są jednakowe. W przypadku diagnostyki prowadzonej przy założeniu uszkodzeń wielokrotnych, diagnoza wskazuje te stany obiektu, których sygnatury są zgodne z uzyskanymi wartościami sygnałów diagnostycznych:

$$DGN(Z) = \{z_i \in Z : \forall_{j \in S} s_j = v(f_k, s_j)\} \quad (15)$$

Stany takie są nierozróżnialne przy danym zbiorze sygnałów diagnostycznych.

3. DIAGNOZOWANIE PRZY ZAŁOŻENIU USZKODZEŃ POJEDYNCZYCH A USZKODZENIA WIELOKROTNE

3.1. Uszkodzenia występujące kolejno

W praktyce bieżąca diagnostyka procesów przemysłowych prowadzona jest najczęściej przy założeniu występowania uszkodzeń pojedynczych. Założenie takie powoduje znaczne uproszczenie algorytmu lokalizacji uszkodzeń. Pojawia się jednak pytanie, czy jest ono w pełni uzasadnione?

W przypadku dużych instalacji technologicznych, składających się z tysięcy urządzeń, jednoczesne istnienie wielu uszkodzonych elementów obiektu jest sytuacją wręcz normalną. Jednak ze względu na to, że diagnozowanie prowadzone jest na bieżąco, diagnoza DGN w chwili n , powinna wskazywać podzbiór uszkodzeń, które wystąpiły od chwili wygenerowania poprzedniej diagnozy:

$$DGN_n = F(1)_n - F(1)_{n-1} = \quad (16)$$

$$= \{f_k : [z(f_k)_n = 1] \wedge [z(f_k)_{n-1} = 0]\}.$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia w krótkim odcinku czasu więcej niż jednego uszkodzenia jest małe. Zatem jeśli uszkodzenia występują kolejno w odstępach większych, niż czas formułowania kolejnych diagnoz, to diagnozy generowane przy założeniu występowania uszkodzeń pojedynczych będą 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 [7, 8, 11].

3.2. Uszkodzenia występujące jednocześnie

Wnioskowanie diagnostyczne przy założeniu uszkodzeń pojedynczych może być zawodne tylko wtedy, gdy dwa lub więcej uszkodzeń wystąpią w krótszym okresie niż czas formułowania diagnozy. Zbiór wartości uzyskanych sygnałów diagnostycznych jest w tym przypadku niezgodny z sygnaturami poszczególnych uszkodzeń i diagnoza o postaci (14) nie może być sformułowana. W szczególnych przypadkach sygnatura stanu z dwoma lub większą liczbą uszkodzeń może być zgodna z sygnaturą stanu pojedynczego uszkodzenia. W takim przypadku wygenerowana zostanie diagnoza fałszywa. Powyższe rozumowanie jest słuszne, jeśli wnioskowanie diagnostyczne prowadzone jest z wykorzystaniem wszystkich sygnałów diagnostycznych. W praktyce do sformułowania diagnozy w przypadku obiektów złożonych nie są potrzebne wartości wszystkich sygnałów diagnostycznych, ale określony ich podzbiór. Poniżej podano zasady wnioskowania wykorzystujące sposób dynamicznej dekompozycji procesu diagnozowanego, stosowany w metodach DTS [7, 8, 11, 12] oraz F-DTS [10, 11, 12]. Dekompozycja ta polega na tym, że po każdym wykryciu symptomu wydzielany jest odpowiedni podsystem, określony przez podzbiory możliwych uszkodzeń i sygnałów diagnostycznych, wykrywających te uszkodzenia. Dla tak wydzielonego podsystemu prowadzone jest dalsze diagnozowanie.

Założmy, że w celach detekcji uszkodzeń wartości poszczególnych sygnałów diagnostycznych kontrolowane są z określonymi okresami. Pierwszy wykryty symptom $s_j^1 = 1$ powoduje rozpoczęcie lokalizacji uszkodzeń. Na podstawie tego symptomu można określić zbiór możliwych uszkodzeń. Obejmuje on wszystkie uszkodzenia wykrywane przez sygnał s_j^1 :

$$(s_j^1 = 1) \Rightarrow F^1 = \{f_k \in F : f_k R_{FS} s_j^1\} \quad (17)$$

Do rozpoznania danej sytuacji awaryjnej tworzony jest podzbiór sygnałów diagnostycznych:

$$S^1 = \{s_j \in S_n : F^1 \cap F(s_j) \neq \emptyset\} \quad (18)$$

gdzie:

$$F(s_j) = \{f_k \in F : f_k R_{FS} s_j\} \quad (19)$$

Zwróćmy uwagę, że podzbiory F^1 oraz S^1 wyznaczają podzbiór relacji diagnostycznej:

$$R_{FS}^1 = \{ \langle f_k, s_j \rangle \in R_{FS} : f_k \in F^1, s_j \in S^1 \} \quad (20)$$

Diagnoza formułowana na podstawie tej cząstkowej relacji przyjmuje postać:

$$DGN(F)/S^1 = \{f_k \in F^1 : \forall_{j \in S^1} s_j = r(f_k, s_j)\} \quad (21)$$

Jeśli w tym samym czasie wystąpi w systemie inne uszkodzenie nie należące do F^1 , to zostanie ono wykryte przez jeden z sygnałów diagnostycznych wrażliwych na to uszkodzenie. Analogicznie do (17) utworzony będzie zbiór możliwych uszkodzeń:

$$(s_j^2 = 1) \Rightarrow F^2 = \{f_k \in F : f_k R_{FS} s_j^2\} \quad (22)$$

oraz podzbiór sygnałów diagnostycznych przydatnych do rozpoznania uszkodzenia:

$$S^2 = \{s_j \in S : F^2 \cap F(s_j) \neq \emptyset\} \quad (23)$$

które wyznaczają podzbiór relacji diagnostycznej :

$$R_{FS}^2 = \{ \langle f_k, s_j \rangle \in R_{FS} : f_k \in F^2, s_j \in S^2 \} \quad (24)$$

Jeśli podzbiory sygnałów diagnostycznych S^1 oraz S^2 są rozłączne:

$$S^1 \cap S^2 = \emptyset \quad (25)$$

to oba uszkodzenia rozpoznawane są prawidłowo, w odrębnych procesach lokalizacji uszkodzeń, prowadzonych przy założeniu uszkodzeń pojedynczych. W takim przypadku podzbiory relacji R_{FS}^1 i R_{FS}^2 są także rozłączne.

Wniosek powyższy można uogólnić: uszkodzenia wielokrotne występujące jednocześnie lub w krótkich odstępach czasu będą prawidłowo lokalizowane przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, jeśli podzbiory uszkodzeń przydatnych do ich rozpoznania są rozłączne.

Jeśli warunek (25) nie jest spełniony, to istnieje sygnał diagnostyczny wrażliwy na oba istniejące uszkodzenia. Proces wnioskowania dla takiej pary powinien być prowadzony, przy założeniu uszkodzeń podwójnych lub ogólnie uszkodzeń wielokrotnych.

4. DIAGNOZOWANIE PRZY ZAŁOŻENIU USZKODZEŃ WIELOKROTNYCH

4.1. Prosty algorytm lokalizacji uszkodzeń wielokrotnych

Lokalizacja uszkodzeń przy założeniu uszkodzeń wielokrotnych wg wzoru (15) wymaga przeszukiwania bardzo licznego zbioru stanów obiektu. Sygnatury stanów tworzone są na podstawie zależności (13). Taki algorytm jest bardzo nieefektywny. W celu redukcji liczby rozpatrywanych stanów tworzone są podzbiory możliwych uszkodzeń, i sygnałów diagnostycznych jako sumy podzbiorów odpowiednio (17) i (22) oraz (18) i (23), a na tej podstawie zbioru możliwych stanów oraz ich sygnatury. Algorytmy lokalizacji uszkodzeń bazujące na tej koncepcji przedstawione zostały w pracach [6, 7, 9].

Pojawia się jednak pytanie: czy konieczne jest przeszukiwanie przestrzeni stanów obiektu (części obiektu), aby sformułować przybliżoną diagnozę o wystąpieniu uszkodzeń wielokrotnych?

Zostanie podany prosty algorytm wnioskowania, który wskazuje możliwe podzbiory uszkodzeń, bez rozpatrywania stanów obiektu. Stosowane jest następujące rozumowanie:

- wartości uzyskanych sygnałów diagnostycznych nie są zgodne z sygnaturami istniejących uszkodzeń (na pozycjach o wartościach zerowych) na skutek istnienia kilku uszkodzeń
- jeśli wystąpiły uszkodzenia wielokrotne, to wystąpiły wszystkie symptomy każdego z tych uszkodzeń.
- aby stwierdzić możliwość istnienia danego uszkodzenia wystarczy sprawdzić czy wystąpiły wszystkie symptomy mu odpowiadające.

Założenie o wystąpieniu uszkodzeń wielokrotnych jest przyjmowane, jeżeli diagnozy nie mogą być sformułowane przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, na sku-

tek braku zgodności uzyskanych wartości sygnałów diagnostycznych z sygnaturami poszczególnych uszkodzeń. Zbiór możliwych uszkodzeń powinien obejmować wszystkie uszkodzenia mogące być przyczyną symptomów zarejestrowanych podczas diagnozowania przy założeniu uszkodzeń pojedynczych.

$$F^* = \bigcup_{j:s_j \in S \wedge s_j=1} F(s_j) \quad (26)$$

Zbiór sygnałów przydatnych do lokalizacji uszkodzeń jest tworzony wg formuły:

$$S^* = \bigcup_{k:f_k \in F^*} S(f_k) \quad (27)$$

gdzie:

$$S(f_k) = \{ s_j : \langle f_k, s_j \rangle \in R_{FS} \} \quad (28)$$

oznacza zbiór sygnałów diagnostycznych, które w przypadku wystąpienia k -tego uszkodzenia powinny przyjmować wartość "1".

Dla każdego uszkodzenia ze zbioru F^* tworzony jest zbiór $S(f_k)$ oraz sprawdzane jest, czy wszystkie sygnały tego zbioru przyjmują wartość 1. Jeśli warunek ten jest spełniony, to uszkodzenie to jest traktowane jako jedno z możliwych uszkodzeń. Diagnoza wskazuje zbiór wszystkich uszkodzeń spełniających ten warunek:

$$DGN(F) = F^S = \{ f_k \in F^* : \forall_{j:s_j \in S(f_k)} s_j = 1 \} \quad (29)$$

Zbiór uszkodzeń określony w diagnozie zawiera nie tylko uszkodzenia istniejące, ale także:

- uszkodzenia nierozróżnialne z istniejącymi (przy wykorzystanym we wnioskowaniu zbiorze sygnałów diagnostycznych)
- uszkodzenia f_m , których podzbiory $S(f_m)$ zawierają się w sumie zbiorów $S(f_k)$ uszkodzeń istniejących.

4.2. Algorytm rozpoznawania stanów obiektu

Liczba możliwych stanów złożonych obiektów przemysłowych, a także wydzielonych przy diagnozowaniu zdecentralizowanym podobiektów jest zwykle bardzo duża. Nie ma jednak potrzeby rozpatrywania wszystkich stanów, aby sformułować diagnozę.

Podany powyżej algorytm wskazujący uszkodzenia, dla których wystąpiły wszystkie symptomy mu odpowiadające może zostać wykorzystany do ograniczenia zbioru rozpatrywanych uszkodzeń. Pierwszym etapem diagnozowania przy założeniu uszkodzeń wielokrotnych jest zatem procedura (28)-(31). Dla zbioru możliwych uszkodzeń (31) wydzielić można zbiór algorytmów detekcyjnych wykrywających te uszkodzenia.

$$S^S = \{ s_j \in S : F(s_j) \cap F^S \neq \emptyset \} \quad (30)$$

Podzbiory F^S oraz S^S wyznaczają analizowany podzbiór relacji diagnostycznej:

$$R_{FS}^S = \{ \langle f_k, s_j \rangle \in R_{FS} : f_k \in F^S, s_j \in S^S \} \quad (31)$$

Na podstawie tej relacji określane są sygnatury stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi. Podzbiór stanów Z^S obejmuje jednak tylko takie, które zawierają kombinacje uszkodzeń ze zbioru F^S :

$$Z^S = \{ z(f_k) : f_k \in F^S \} \quad (32)$$

Dodatkowo ograniczyć można zbiór analizowanych stanów obiektu, uwzględniając tylko stany o liczbie uszkodzeń nie większej niż dwa lub trzy.

Diagnoza formułowana wskazuje stany, których sygnatury są zgodne z wartościami uzyskanych sygnałów diagnostycznych.

$$DGN(Z^S) = \{z_i \in Z^S : \forall_{j,s_j \in S^S} s_j = v(f_k, s_j)\} \quad (33)$$

5. DIAGNOSTYKA W STRUKTURACH ZDECENTRALIZOWANYCH

5.1. Uwagi wstępne

Podana w p.3 metoda wnioskowania polega na dynamicznym wydzieleniu podzbioru możliwych uszkodzeń oraz sygnałów diagnostycznych do ich lokalizacji. Rozpatrywany jest pewien podsystem określony przez podzbiór binarnej macierzy diagnostycznej. Podobne efekty przynosi dekompozycja obiektu i diagnozowanie w strukturach zdecentralizowanych. [6, 7, 9].

Struktury współczesnych komputerowych systemów automatyki są zdecentralizowane, przestrzennie rozproszone. Funkcje diagnostyczne stanowiące integralną część zadań sterowania i zabezpieczenia obiektu realizowane muszą być również w strukturach zdecentralizowanych. Zatem przy projektowaniu diagnostyki obiektów złożonych konieczne jest przeprowadzenie dekompozycji obiektu na podobiekty sterowane i diagnozowane przez odrębne jednostki komputerowe. Zwykle nie można wydzielić całkowicie niezależnych podobiektów. To powoduje, że symptomy uszkodzeń powstałych w jednym podobiecku mogą być obserwowane także w innych sprzężonych podobiektach. Algorytmy diagnozowania w strukturach zdecentralizowanych muszą ten problem uwzględniać.

5.2. Dekompozycja systemu diagnozowania

Dekompozycja może być przeprowadzona w sposób arbitralny lub tak, aby wydzielić podsystemy o ograniczonych rozmiarach, charakteryzujące się największym stopniem niezależności. Metoda postępowania w tym drugim przypadku została podana w pracach [7, 9].

Założmy, że w sposób arbitralny wydzielono podsystemy o rozłącznych podzbiórach sygnałów diagnostycznych. Przyjmujemy, że diagnozowanie prowadzone jest w strukturze zdecentralizowanej, jednopoziomowej. Poszczególne jednostki diagnozujące realizują rozłączne podzbiory algorytmów detekcyjnych (testów):

$$S_m \cap S_n = \emptyset; \quad m \neq n, m, n = 1, 2, \dots, N \quad (34)$$

Podzbiory wykrywanych uszkodzeń:

$$F_m \cap F_n \neq \emptyset; \quad m \neq n, m, n = 1, 2, \dots, N \quad (35)$$

w podsystemach nie są w przypadku ogólnym rozłączne, przy czym zbiór uszkodzeń wykrywanych w n -tym podsystemie jest następujący:

$$F_n = \bigcup_{s_j \in S_n} F(s_j) \quad (36)$$

Podzbiór uszkodzeń wykrywanych równolegle w dwóch podsystemach m i n określony jest następująco:

$$F_{m,n} = \{f_k \in F_m \cap F_n\} \quad (37)$$

Relacje:

$$R_{FS}^n = F_n \times S_n \subset R_{FS} \quad (38)$$

są podzbiórmi relacji R_{FS} dla całego obiektu. Każdy podsystem określony jest następującą trójką:

$$O_n = \langle F_n, S_n, R_{FS}^n \rangle. \quad (39)$$

5.3. Diagnozowanie zdecentralizowane

Każda jednostka diagnozująca w zdecentralizowanej strukturze diagnozowania wykrywa oraz lokalizuje uszkodzenia w określonym podsystemie O_n . Diagnoza wstępna w podsystemie formułowana przy założeniu uszkodzeń pojedynczych wskazuje podzbiór uszkodzeń, których sygnatury $V_n(f_k)$ są zgodne z aktualnymi wartościami V_n sygnałów diagnostycznych:

$$DGN_n^* = \{f_k \in F_n : (V_n(f_k) = V_n)\} \quad (40)$$

gdzie:

$$V_n(f_k) = V_n \Leftrightarrow \forall [v_j(f_k) = v_j]. \quad (41)$$

gdzie: v_j - aktualna wartość sygnału s_j , $v_j(f_k)$ - wartość wzorcowa (4).

Określmy zbiór uszkodzeń wykrywanych wyłącznie w danym n -tym podsystemie:

$$F_n^W = F_n - \bigcup_{\substack{n=1 \\ n \neq n}}^N F_{m,n} \quad (42)$$

Jeśli wszystkie uszkodzenia wskazywane w diagnozie wstępnej DGN_n^* należą do zbioru F_n^W to diagnoza taka nie może być uściślona lub zweryfikowana na podstawie sygnałów diagnostycznych realizowanych w innych podsystemach. Ma ona charakter ostateczny.

$$DGN_n^* \subseteq F_n^W \Rightarrow DGN_n^* = DGN_n^* \quad (43)$$

W przypadku gdy:

$$DGN_n^* \not\subseteq F_n^W \quad (44)$$

diagnoza wstępna zawiera uszkodzenia wykrywane w innych podsystemach, to może być uściślona lub zweryfikowana na podstawie diagnoz w innych podsystemach, dla których $F_{m,n} \neq \emptyset$.

Modyfikacji diagnozy sformułowanej w n -tym podsystemie na podstawie wyników diagnozowania w m -tym podsystemie powinna być przeprowadzona jeśli diagnoza wstępna (12) zawiera elementy należące do zbioru $F_{m,n}$:

$$DGN_n^* = \{f_k \notin F_{m,n} \cup f_i \in F_{m,n}\} \quad (45)$$

W przypadku, gdy diagnoza wstępna w m -tym podsystemie nie zawiera uszkodzeń wskazywanych w diagnozie DGN_n^* , to zakładając uszkodzenia pojedyncze, należy wykluczyć je z diagnozy ostatecznej n -tego podsystemu:

$$DGN_n^* \cap DGN_m^* = \emptyset \Rightarrow DGN_{n,m}^* = \{f_k \notin F_{m,n}\} \quad (46)$$

W przypadku, gdy diagnoza wstępna w m -tym podsystemie zawiera uszkodzenia należące do DGN_n^* , to należy wnioskować, że wystąpiło któreś z uszkodzeń wskazywanych w obu podsystemach:

$$DGN_n^* \cap DGN_m^* \neq \emptyset \Rightarrow \quad (47)$$

$$DGN_{n,m}^* = DGN_n^* \cap DGN_m^*.$$

W celu uzyskania diagnozy ostatecznej DGN_n^* należy przeprowadzić modyfikacją diagnozy wstępnej na pod-

stawie wyników diagnoz we wszystkich innych podsystemach, dla których $F_{m,n} \neq \emptyset$.

6. PODSUMOWANIE

W referacie przedyskutowano problemy diagnozowania uszkodzeń wielokrotnych. Można sformułować następujące wnioski:

- a) Nie ma całkowicie niezawodnej metody wyznaczenia sygnatur stanów obiektu z uszkodzeniami wielokrotnymi na podstawie sygnatur poszczególnych uszkodzeń.
- b) Diagnozy generowane przy założeniu występowania uszkodzeń pojedynczych są prawidłowe, jeśli uszkodzenia występują kolejno w odstępach większych, niż czas formułowania kolejnych diagnoz.
- c) Uszkodzenia wielokrotne występujące jednocześnie lub w krótkich odstępach czasu będą prawidłowo lokalizowane przy założeniu uszkodzeń pojedynczych, jeśli dynamicznie określane podzbiory sygnałów diagnostycznych przydatnych do ich rozpoznania są rozłączne.
- d) Nie rozpatrując stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi można wskazać zbiór uszkodzeń zawierający istniejące uszkodzenia. Podano odpowiedni algorytm wnioskowania.
- e) Przy diagnozowaniu prowadzonym przy założeniu uszkodzeń wielokrotnych możliwe jest ograniczenie zbioru rozpatrywanych stanów w obiekcie (podobnie) w celu redukcji nakładów obliczeniowych. W p.4.2. podano efektywny algorytm rozpoznawania stanów obiektu.
- f) Dekompozycja obiektu i diagnozowanie zdecentralizowane umożliwia w wielu przypadkach lokalizację uszkodzeń wielokrotnych pomimo wnioskowania prowadzonego przy założeniu uszkodzeń pojedynczych.

PROBLEM OF MULTIPLE FAULTS IN DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL PROCESSES

Abstract: The issues of on-line diagnostics of multiple faults in industrial processes have been considered in the paper. The analysis of isolability of multiple faults has been done under hypothesis of single faults occurrence. Algorithm for recognition of system states has been presented. The problem of multiple fault recognition in case of diagnosing in decentralised structures has been discussed.

Literatura

- [1] Chen J., Patton R.J. (1999) *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [2] Clark R.N. (1989) *State estimation schemes for instrument fault detection*, Chapter 2 in: Patton, Frank, Clark.
- [3] de Kleer J., Williams B.C. (1987) Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32, 97-130.
- [4] Frank P.M. (1987) Fault diagnosis in dynamic systems via state estimations methods - a survey, w: S.G. Tzafestas et al. (Eds). *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, Vol. 2. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / Lancaster / Tokyo.
- [5] Gertler J. (1998) *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong.
- [6] Kościelny J.M. (1991) Diagnostyka ciągłych zautomatyzowanych procesów przemysłowych metodą dynamicznych tablic stanu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Elektronika*, 95, Warszawa.
- [7] Kościelny J.M. (1995) Fault Isolation in Industrial Processes by Dynamic Table of States Method. *Automatica*, 31, 5, 747-753.
- [8] Kościelny J.M., Sędziak D. (1999) Zakroczymski K. (1999) Fuzzy Logic Fault Isolation in Large Scale Systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 9, 3, 637-652.
- [9] Kościelny J. M. (2001) *Diagnostics of Automated Industrial Processes* (in Polish). Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.
- [10] Kościelny J.M. (2002) w: Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W., *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. WNT, Warszawa.
- [11] Patton R., Frank P., Clark R. (1989) *Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- [12] Patton R.J., Frank P.M., Clark R.N. (2000) *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer.
- [13] Reiter R. A. (1987) Theory of Diagnosis from First Principles. *Artificial Intelligence*, 32, 57-95.
- [14] Staroswiecki M., Cassar J.P., Declerck P. (2000) w: Patton R.J., Frank P.M., Clark R.N., *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4