

## SYSTEM ZAAWANSOWANEGO MONITOROWANIA I DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH 'AMandD'<sup>\*</sup>

Jan Maciej KOŚCIELNY, Michał SYFERT, Paweł WNUK

Institute of Automatic Control and Robotics, Warsaw University of Technology  
ul. Chodkiewicza 8, 02-525 Warsaw, Poland  
e-mail: {jmk, m.syfert, p.wnuk}@mchtr.pw.edu.pl

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano strukturę oraz właściwości użytkowe systemu zaawansowanego monitorowania i diagnostyki AMandD. System ten przeznaczony jest dla złożonych procesów przemysłowych. Przedstawiono opis wykorzystanych w systemie nowoczesnych algorytmów modelowania oraz detekcji i lokalizacji uszkodzeń jak i wykorzystanych rozwiązań informatycznych. Na zakończenie zarysowano także kierunki dalszych badań i rozwoju systemu.

Słowa kluczowe: system wspomagania decyzji, nadzorowanie, diagnostyka uszkodzeń, symulatory procesów.

### ADVANCED MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM OF INDUSTRIAL PROCESSES 'AMandD'

### Summary

The paper presents structure and functional properties of the Advanced Monitoring and Diagnostic System 'AMandD' dedicated for large scale industrial processes. Applied in the system up-to-date algorithms of modeling methods and fault detection and isolation were described in the paper. Also a brief description of used IT solutions was presented. As a conclusion, the further directions of development and researches were mentioned.

Keywords: decision support systems, supervision, fault diagnosis, process simulators.

## 1. PRZEZNACZENIE SYSTEMU

Głównym zadaniem systemu *AMandD* (rys. 1) jest wczesne i dokładne rozpoznawanie nieprawidłowych stanów procesu przemysłowego oraz uszkodzeń urządzeń technologicznych, wykonawczych i pomiarowych. 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 energetycznym, chemicznym, farmaceutycznym, hutniczym, spożywczym i innych.

System jest rozwiązaniem unikatowym w skali światowej. Został on opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Wcześniejsze rozwiązania systemów diagnostycznych (np. systemy MODI firmy ABB i KNOBOS firmy Siemens) były zorientowane na konkretne obiekty - kotły bloków energetycznych i funkcjonowały wg innych zasad. Z drugiej strony – dostępne na rynku pakiety modelowania procesów są zazwyczaj dość silnie zintegrowane z jakimś systemem automatyki (przykładowo ShadowPlant firmy Honeywell) oraz nie mają możliwości łączenia modeli fizykochemicznych z modelami

<sup>\*</sup> Praca powstała w ramach Programu Wieloletniego PW-004 pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004-2008”, ustanowionego przez Radę Ministrów RP; grant zamawiany nr PW-004/ITE/07/2005 nt. „Zaawansowany system i urządzenia diagnostyczne dla aparatów technologicznych i procesów”.

identyfikowanymi na podstawie danych procesowych. *AMandD* ze względu na otwartą architekturę umożliwia połączenie z praktycznie dowolnym systemem automatyki z jednej strony, z drugiej – zawiera implementację szerokiej gamy najnowszych algorytmów, zarówno w dziedzinie diagnostyki, jak i identyfikacji, czego nie oferują produkty komercyjne dostępne na rynku.



Rys. 1. Podstawowe zadania systemu *AMandD*

## 2. FUNKCJE SYSTEMU

System *AMandD* umożliwia realizację następujących zadań:

- modelowanie procesów – zarówno przy wykorzystaniu modeli identyfikowanych w formie „czarnej” czy „szarej skrzynki”, jak i budowę modeli bilansowych czy fizykochemicznych. Modele budowane przy pomocy systemu *AMandD* mogą być wykorzystywane w czasie rzeczywistym,
- przetwarzanie zmiennych procesowych – konfigurowalne w postaci schematu bloków funkcyjnych, dzięki czemu proste staje się tworzenie systemów obliczeń bilansowych/sprawnościowych, a także praktycznie dowolne przekształcanie mierzonych zmiennych zgodnie z algorytmami wprowadzonymi przez użytkownika,
- budowę programowych sensorów i analizatorów bazujących na modelach procesów oraz rekonstrukcję wartości zmiennych procesowych. W oparciu o model (analityczny lub identyfikowany) przy wykorzystaniu systemu *AMandD* jest możliwe zarówno odtwarzanie pomiarów, które tymczasowo są niedostępne (np. z powodu uszkodzenia czujnika) jak i nieosiągalne pomiarowo w czasie rzeczywistym (np. zawartość części palnych w popiele),
- budowę programowych symulatorów procesów ogólnego stosowania, ze szczególnym uwzględnieniem szkolenia załogi,
- detekcję uszkodzeń – system umożliwia wykrywanie faktu wystąpienia uszkodzenia w nadzorowanej instalacji, niezależnie od tego czy uszkodzeniu uległo jedno z urządzeń technologicznych, pomiarowych czy wykonawczych,

- lokalizację uszkodzeń nagłych i powoli narastających. System jest w stanie precyzyjnie wskazać zaistniałe uszkodzenie lub podzbiór możliwych uszkodzeń oraz w przypadku urządzeń podlegających powolnej degradacji – oszacować stopień niesprawności urządzenia,
- wizualizację wyników diagnozowania,
- wspomaganie decyzji operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych, przez co rozumie się automatyczne dostarczanie operatorom instrukcji postępowania w przypadku sytuacji nienormalnej – awaryjnej.

Należy natomiast podkreślić że system *AMandD* nie realizuje bezpośrednio zadania sterowania instalacją. Pełni on rolę systemu nadzorczego-doradczego.

Ze względu na otwartą architekturę oraz zastosowanie nowoczesnych technologii informatycznych funkcje systemu *AMandD* mogą zostać w łatwy sposób rozszerzone. Rozszerzenia takie realizowane są w ramach planowego rozwoju systemu podczas, którego dodawane są nowe moduły implementujące kolejne algorytmy zaawansowanego monitorowania i diagnostyki. Możliwe jest także tworzenie specjalistycznych modułów systemu przeznaczonych do realizacji specjalizowanych zadań związanych z konkretną aplikacją.

### 2.1. Symulacja i modelowanie

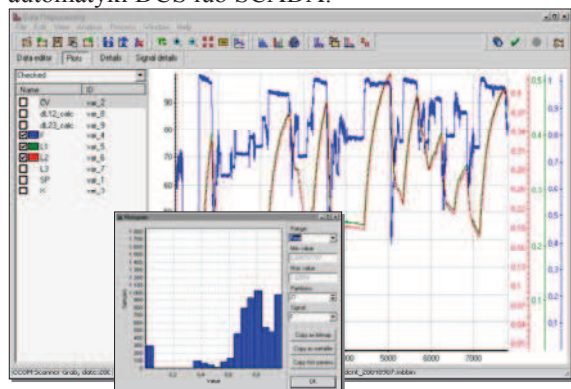
Stosowanie nowych strategii zarządzania procesami przemysłowymi coraz częściej wymaga tworzenia modeli procesu czy też jego części. Modele wiernie naśladujące przebieg rzeczywistego procesu są potrzebne między innymi w celu optymalizacji pracy instalacji, testowania nowych strategii sterowania czy też szkolenia operatorów. Modele znacznie mniejszej skali, wyliczające tylko pojedyncze zmienne procesowe (np. model zawartości CO<sub>2</sub> w spalinach czy temperatury w reaktorze) można wykorzystywać jako analityczną redundancję rzeczywistego pomiaru, czy też jako jego odpowiednik w przypadku, gdy pomiaru brakuje.

Do tworzenia modeli globalnych całej instalacji w pakiecie *AMandD* wykorzystywany jest moduł *CalcPaths*. Natomiast modele fragmentów procesu czy też poszczególnych zmiennych procesowych uzyskiwane są zazwyczaj na drodze identyfikacji, prowadzonej przy wykorzystaniu istniejących archiwalnych przebiegów zmian wartości poszczególnych sygnałów.

W pakiecie *AMandD* do celów identyfikacji przeznaczony jest moduł *MITforRD*. Umożliwia on tworzenie modeli poszczególnych części instalacji technologicznej bez konieczności znajomości analitycznej postaci związków pomiędzy poszczególnymi pomiarami. Przykładowo w celu utworzenia modelu temperatury w reaktorze nie jest wymagana od inżyniera wiedza o reakcji tam zachodzącej czy też postać równań opisujących daną

reakcję, lecz jedynie dostępność archiwalnych pomiarów modelowanej wielkości oraz zmiennych, od których dana wielkość zależy.

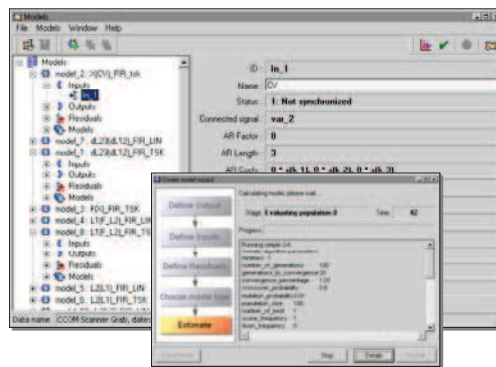
*MITforRD* pozwala na identyfikację modeli zarówno statycznych jak i dynamicznych różnych typów, poczynając od szeroko znanej transmitancji liniowej, a kończąc na modelach neuronowych i rozmytych. Identyfikacja prowadzona jest w trybie off-line z wykorzystaniem danych pomiarowych zbieranych i archiwizowanych w systemach automatyki DCS lub SCADA.



Rys. 2. Analiza i wstępne przetwarzanie danych w module *MITforRD*

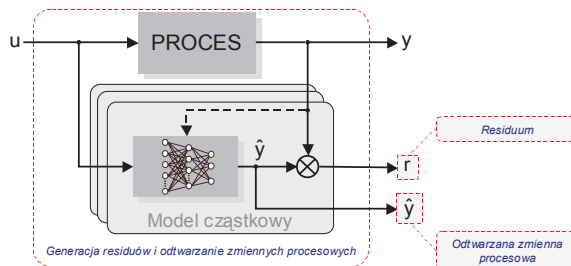
Oprogramowanie umożliwia komfortową pracę z danymi pomiarowymi (rys. 2). Wbudowany edytor pozwala na zmianę wartości poszczególnych próbek, sygnały mogą być wyświetlane na kilka sposobów, z wygodnymi funkcjami powiększania i przesuwania wykresów oraz prezentacji wielu serii danych na jednym wykresie. Analiza danych jest możliwa dzięki szeregowi wtyczek (*ang. plugin*) umożliwiających m. in. wyświetlanie korelacji, spektrum mocy, histogramów, trendów, filtrację oraz swobodne przekształcanie sygnałów wg wprowadzonego przez użytkownika wyrażenia matematycznego. Całości dopełniają funkcje importu danych z zewnętrznych formatów oraz funkcje umożliwiające łączenie danych.

Sam proces identyfikacji obiektu wykorzystuje koncepcję asystentów wspierających użytkownika i sprowadza się do potrzeby udzielenia odpowiedzi na kilka prostych pytań, np. o wybór sygnałów wejściowych, typu modelu (liniowy, neuronowy, rozmyty, itp.) oraz określenia podstawowych parametrów procedury identyfikacyjnej (rys. 3). W odróżnieniu od innych programów tego typu w pakiecie *MITforRD* nie wymaga się od użytkownika głębokiej wiedzy z dziedziny identyfikacji i umiejętności programowania. Jest to także jedyne środowisko o tak szerokiej gamie dostępnych typów modeli zaopatrzonych w jednolity interfejs użytkownika, możliwych do natychmiastowego zastosowania w pracy on-line.



Rys. 3. Identyfikacja i zarządzanie modelami w module *MITforRD*

W celu automatycznego poszukiwania struktury modeli pakiet stosuje najnowsze algorytmy z dziedziny inteligencji obliczeniowej (algorytmy genetyczne, roju cząstek, uczenie maszynowe), co pozwala na uzyskanie modeli wysokiej jakości nawet w przypadku niewystarczającej wiedzy o modelowanych procesach.

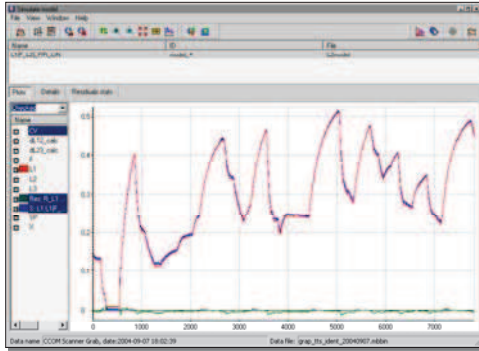


Rys. 4. Funkcje modułu *MITforRD* - *Real Time Simulator* w trybie on-line

W trybie on-line moduł *MITforRD* na podstawie bieżących wartości pomiarowych wylicza zmienne procesowe będące wyjściami modeli. W ten sposób realizowana jest redundancja informacyjna (rys. 4). Wirtualne sensory mogą służyć między innymi do rekonstrukcji wartości sygnałów w przypadku uszkodzonych lub czasowo odłączonych torów pomiarowych. Moduł *MITforRD* wylicza także na bieżąco wartości residuów, tj. różnice między wartościami sygnałów mierzonych i modelowanych.

Aktualnie przy pomocy modułu *MITforRD* mogą być identyfikowane (rys. 5) modele statyczne i dynamiczne następujących typów:

- klasyczne modele liniowe w formie transmitancji dla czasu dyskretnego  $G(z)$ . Identyfikacja jest prowadzona na podstawie minimalizacji kryterium LS (Least Square) przy wykorzystaniu algorytmu SVD, przy czym poszukiwane są również prawidłowe wartości opóźnień oraz rząd modelu,
- modele w formie sztucznych sieci neuronowych (ANN) o klasycznej strukturze, tzn. w formie wielowarstwowej sieci neuronowej. Dostępne są różnorodne algorytmy uczenia sieci, poczynając od wstecznej propagacji błędów, poprzez metodę gradientów sprzężonych, a kończąc na symulowanym wyżarzaniu czy też optymalizacji genetycznej,



Rys. 5. Przykład modelowania sygnałów z w systemie *AmandD*

- modele rozmyte o strukturze TSK, z identyfikowaną strukturą, parametrami rozmywania oraz współczynnikami równań opisujących zachowanie się obiektu w poszczególnych obszarach. Funkcja następnika ma postać wielomianową, co jest rozwiązaniem unikalnym. Identyfikacja takich modeli jest wykonywana przy pomocy specjalizowanego algorytmu ewolucyjnego.
- modele wielomianowe (identyfikacja struktury wielomianu oraz estymacja współczynników).

Powyższa lista nie zamyka wszystkich możliwych typów modeli. Dzięki otwartej architekturze, opartej na wtyczkach (*ang. plugin*) możliwa jest łatwa rozbudowa listy dostępnych modeli, zarówno poprzez autorów systemu, jak i jednostki niezależne.

Budowanie modeli analitycznych (np. bilansowych) w systemie *AmandD* jest możliwe przy zastosowaniu modułu *CalcPaths*.

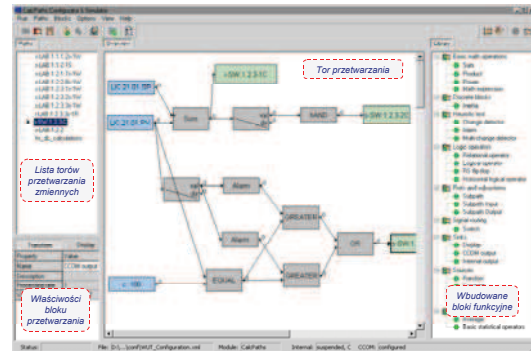
## 2.2. Przetwarzanie zmiennych procesowych

W systemie *AmandD* możliwe jest swobodne projektowanie torów przetwarzania poszczególnych zmiennych systemowych (procesowych). Zadanie to realizowane jest przez moduł *CalcPaths* (rys. 6). Moduł ten umożliwia tworzenie torów przetwarzania poszczególnych sygnałów przy pomocy różnego rodzaju bloków funkcyjnych, zarówno statycznych jak i dynamicznych, w sposób zbliżony do rozwiązania zastosowanego w pakiecie Matlab Simulink.

Moduł *CalcPaths* może pobierać dane zarówno z procesu (przez odpowiednie bloki łączące) jak też z innych źródeł oraz działać jak generator sygnałów. Obliczone wartości wyjściowe mogą być przekazane zarówno do innych modułów systemu *AmandD*, jak i z powrotem do systemu automatyki.

Użytkownik ma do dyspozycji szereg bloków realizujących podstawowe operacje matematyczne i logiczne, operacje wejścia i wyjścia, sterowanie przepływem sygnałów, operatory całkowania i różniczkowania, filtrację, specjalistyczne testy diagnostyczne i wiele innych. Ponadto dzięki otwartej architekturze możliwa jest łatwa rozbudowa

i tworzenie nowych specjalizowanych bloków w postaci wtyczek.



Rys. 6. Moduł przetwarzania zmiennych procesowych – *CalcPaths*

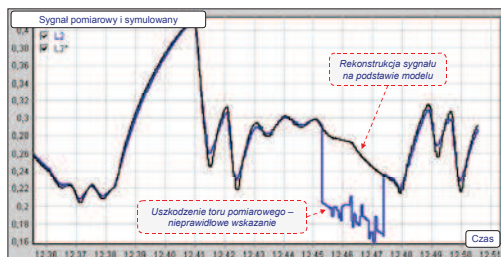
Moduł *CalcPaths* stosowany może być do budowania modeli analitycznych, bazujących np. na równaniach fizyko-chemicznych, wykorzystywanych potem jako symulatory procesów lub ich części składowych. Moduł zawiera także zbiór prostych algorytmów pozwalających na tworzenie testów heurystycznych dla potrzeb detekcji uszkodzeń. Inne możliwości wykorzystania modułu to: obliczenia bilansowe, wyznaczanie wartości wskaźników sprawności urządzeń, warunkowe sterowanie przepływem informacji, itp.

## 2.3. Wirtualne sensory i analizatory

Wirtualne sensory budowane z wykorzystaniem modeli analitycznych, neuronowych lub rozmytych stanowią redundancję informacyjną sygnałów pomiarowych. Pomiar niektórych wielkości fizycznych są kosztowne, innych niemożliwe do realizacji w sposób ciągły. W miejsce redundancji sprzętowej w wielu przypadkach korzystniej jest wykorzystać modele procesów do wyliczania wartości wielkości fizycznych na podstawie innych mierzonych zmiennych procesowych. Przykładowo w energetyce szczególnie celowa jest budowa wirtualnych analizatorów emisji NO<sub>x</sub> i CO<sub>x</sub> (analizatory sprzętowe sprawiają wiele kłopotów eksploatacyjnych) oraz analizatorów zawartości części palnych w popiele (bezpośredni pomiar w czasie rzeczywistym tej wielkości jest trudno osiągalny, zwykle analizy dokonuje się w laboratorium z dużym opóźnieniem). Analizatory programowe są strojone z wykorzystaniem wzorcowych analizatorów sprzętowych, bądź też wartości otrzymywanych na drodze analiz laboratoryjnych.

W przypadku stosowania redundancji informacyjnej, jeśli dojdzie do uszkodzenia toru pomiarowego, to wartość zmiennej może być rekonstruowana na podstawie wirtualnego sensora lub analizatora (rys. 7). Uzyskujemy w ten sposób odporność systemu na uszkodzenia tych torów pomiarowych, dla których istnieją odpowiedniki wirtualne. Odporność ta dotyczy wszelkich obliczeń

prowadzonych z wykorzystaniem wartości takich sygnałów (bilansów, obliczeń wskaźników technicznych, ekonomicznych itp.), a także układów sterowania wykorzystujących redundancję informacyjną.



Rys. 7. Przykład walidacji torów pomiarowych bazujący na wykorzystaniu redundancji analitycznej

## 2.4. Symulatory procesów

Współczesne instalacje technologiczne stają się coraz bardziej skomplikowane. Jednocześnie rosną wymagania odnośnie niezawodności i ciągłości pracy takich instalacji, jak też utrzymywania punktu pracy w pobliżu maksimum wydajności. Wymaga to z jednej strony niezawodnych systemów automatyki i diagnostyki procesu oraz stosowania procedur optymalizacyjnych, z drugiej doskonale wyszkolonych i przygotowanych operatorów. Wymaganie dotyczące stopnia przygotowania operatorów jest szczególnie trudne do spełnienia. Stwierdzono bowiem, że wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji i niezawodności instalacji procesowej kwalifikacje operatorów w zakresie podejmowania właściwych działań w sytuacjach nietypowych i awaryjnych ulegają zmniejszeniu.

Ponadto szkolenia operatorów na rzeczywistej i pracującej instalacji są nieefektywne ze względu na: ograniczone możliwości działania w warunkach uszkodzenia, rozruchu czy też zmiany punktu pracy instalacji, brak możliwości wprowadzania rzeczywistych uszkodzeń oraz zwiększenie zatrudnienia ze względu na potrzebny długi okres szkolenia pod okiem bardziej doświadczonych operatorów. Nawet przy najdłuższym okresie szkolenia zazwyczaj nie zdarzą się wszystkie możliwe stany pracy instalacji, co prędzej czy później doprowadzi do sytuacji, kiedy operator będzie musiał pracować w warunkach, do których nie został przygotowany (przykładowo wystąpienie awarii, która nie wystąpiła w okresie jego szkolenia).

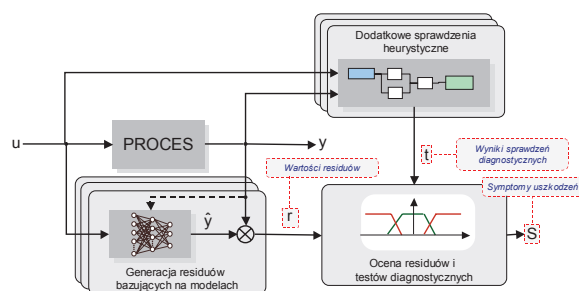
Uniknięcie wszystkich wymienionych wyżej niedogodności jest możliwe dzięki zastosowaniu symulatorów procesów. Symulator taki zazwyczaj składa się z systemu automatyki, który nadzoruje daną instalację oraz oprogramowania, które symuluje zachowanie się rzeczywistego procesu. System *AMandD* może zostać wykorzystany do tworzenia tego typu symulatorów. Dzięki modułowi *CalcPaths* można zbudować fizykochemiczny model procesu, przy czym kluczowe czy też najbardziej skomplikowane fragmenty mogą być modelowane przy pomocy modeli cząstkowych

uzyskanych na drodze identyfikacji przez pakiet *MITforRD*. Modele tworzone przy pomocy modułu *CalcPatch* można w łatwy sposób dostroić do pracy rzeczywistego obiektu z wykorzystaniem danych archiwalnych. Model jest łączony z systemem automatyki i przez niego sterowany dokładnie tak, jak rzeczywista instalacja. Dzięki takiemu podejściu operatorzy pracują w środowisku identycznym do docelowego stanowiska pracy, co pozwala na maksymalne uwiarygodnienie szkolenia. Prowadzący szkolenie może wprowadzać wszelkie możliwe uszkodzenia do modelowanej instalacji. Szkoleni trenują sterowanie w stanach nienormalnych i awaryjnych, mogą przeprowadzać dowolnie dużo rozruchów i zatrzymań procesu, zmian punktów pracy, itp. Ewentualne błędy operatorów w trakcie szkolenia nie mają negatywnych konsekwencji, co w rezultacie daje możliwość pełnego przeszkolenia załogi.

Symulator procesu opracowany dla celów szkolenia operatorów można później wykorzystać również do testowania nowych strategii sterowania lub optymalizacji pracy procesu.

## 2.5. Detekcja uszkodzeń

Pierwszym zadaniem stawianym systemowi diagnostyki procesów jest wykrycie uszkodzenia. W niektórych przypadkach problem jest trywialny (przecięcie kabla zasilającego czujnik spowoduje alarm w systemie automatyki), lecz często samo wykrycie istnienia uszkodzenia jest niemożliwe przy zastosowaniu klasycznych metod. Przykładem takiego uszkodzenia może być wyciek substancji trującej ze zbiornika o regulowanym poziomie. W trakcie pracy w trybie automatycznym wyciek zostanie skompensowany przez regulator, i w rezultacie operatorzy oraz dozór techniczny nie będą w stanie wykryć faktu istnienia uszkodzenia.

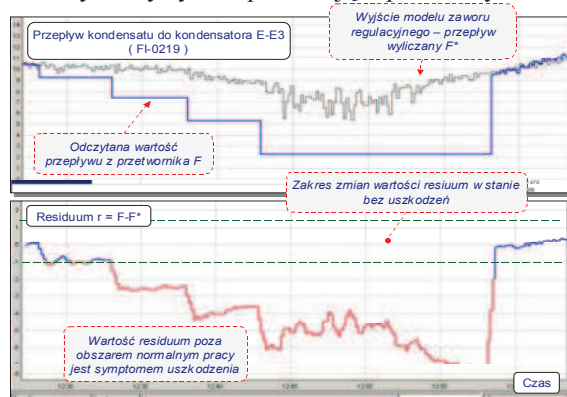


Rys. 8. Schemat detekcji uszkodzeń z zastosowaniem modeli oraz zależności heurystycznych

W systemie *AMandD* do detekcji uszkodzeń stosowane są metody bazujące na modelach analitycznych, neuronowych i rozmytych oraz metody heurystyczne wykorzystujące różnego rodzaju relacje między zmiennymi procesowymi [1, 2] (rys. 8), które pozwalają wykryć znacznie większą liczbę uszkodzeń niż klasyczny system alarmowy. Dodatkową zaletą jest czułość tych metod, która w wielu przypadkach pozwala na

wczesne wykrycie uszkodzenia o małych rozmiarach (np. zarastanie gniazda zaworu regulacyjnego lub początek reakcji pasożytniczej w reaktorze chemicznym), zanim ujawnią się negatywne jego skutki. Istnieje w takim przypadku możliwość podjęcia odpowiednich działań zabezpieczających lub naprawczych, ograniczających skutki i straty spowodowane uszkodzeniami.

Detekcja uszkodzeń z zastosowaniem modeli poszczególnych sygnałów polega na ocenie tzw. residuów, tj. różnicy między wartością sygnału mierzonych  $y$  oraz wyjściem modelu  $y_M$ . W stanie normalnym wartość residuum  $r$  jest bliska zera, natomiast po wystąpieniu uszkodzenia w kontrolowanej części obiektu wartość residuum odbiega od zera, co stanowi symptom uszkodzenia. Metody heurystyczne pozwalają zapisać w systemie



Rys. 9. Detekcja uszkodzenia zaworu regulacyjnego

diagnostycznym dodatkową wiedzę o prawidłowym działaniu instalacji. Metody te wykorzystują proste a także bardziej złożone zależności pomiędzy zmiennymi procesowymi, np. relacje gradientu temperatur w kolumnach i piecach, gradient spadku ciśnienia w rurociągach czy bilanse strumieni mediów. Zależności tego typu są niedoceniane i pomijane przy tworzeniu systemów alarmowych. Tymczasem doświadczenie projektowe wskazuje, iż stanowią one bardzo istotne i pewne źródło informacji o stanie procesu i występujących w nim uszkodzeniach. Wiedza o tego typu związkach jest często w posiadaniu technologów, automatyków i operatorów procesu, natomiast *AMandD* dostarcza narzędzi do jej zapisania i wykorzystania w trakcie bieżącej diagnostyki instalacji.

Rezultatem algorytmów detekcyjnych są sygnały diagnostyczne niosące informację o wykrytych uszkodzeniach. Na podstawie analizy wartości sygnałów diagnostycznych prowadzona jest lokalizacja uszkodzeń, czyli dokładne określenie uszkodzonego komponentu, oraz stopnia jego uszkodzenia.

Detekcja uszkodzeń realizowana jest w modułach: *MITforRD* (wylizanie residuów bazujących na modelach), *CalcPaths* (wyznaczanie dodatkowych testów diagnostycznych) oraz w module *iFuzzy-FDI* (rozmyta ocena residuów oraz wyników innych sprawdzeń diagnostycznych).

Na rys. 9 pokazano przebiegi mierzonych i modelowanego przepływu kondensatu do kondensatora oraz przebieg wyznaczonego residuum. Symulowano uszkodzenie zaworu regulacyjnego poprzez jego ręczne przymknięcie przez operatora procesu. Osiągnięcie przez residuum wartości spoza zakresu normalnej pracy jest symptomem wprowadzonego uszkodzenia. Badania przeprowadzono w Zakładach Azotowych Puławy S.A. na instalacji produkcji mocznika.

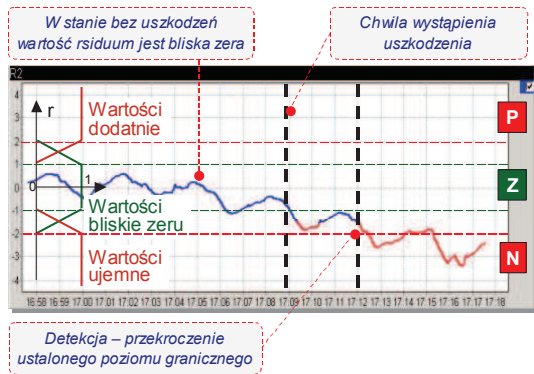
## 2.6. Lokalizacja uszkodzeń

Do lokalizacji uszkodzeń w przypadku instalacji przemysłowych mało przydatne są metody wymagające danych wzorcowych dla stanów nienormalnych i awaryjnych (do tej klasy metod należą np. sieci neuronowe). Pozyskanie danych uczących dla wszystkich stanów nienormalnych (z uszkodzeniami) jest praktycznie niemożliwe, z drugiej strony groźne uszkodzenia występujące po raz pierwszy powinny być szybko rozpoznane. Największe znaczenie praktyczne w diagnostyce procesów przemysłowych mają metody wykorzystujące wiedzę ekspercką do zaprojektowania relacji symptom - uszkodzenia. W systemie *AMandD* relacja ta określana jest na podstawie wiedzy dotyczącej funkcjonowania obiektu, którą oprócz projektantów posiadają m.in. technolodzy, automatycy i operatorzy procesu.

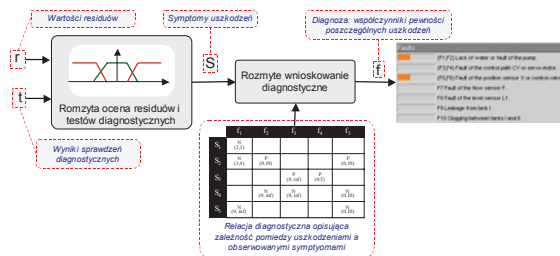
Przy diagnozowaniu procesów przemysłowych występuje wiele niepewności, które utrudniają wnioskowanie diagnostyczne. Niepewne są symptomy uszkodzeń wykrywanych zarówno z zastosowaniem modeli jak też bez wykorzystania modeli. Trudności sprawia określenie wartości progowych, których przekroczenie świadczy o wystąpieniu uszkodzenia. Wiedza ekspertów o relacji między uszkodzeniami a zaobserwowanymi symptomami jest często również niepewna. Wszystkie powyższe niepewności powinny być uwzględniane w procesie wnioskowania. Skutecznym sposobem przetwarzania informacji niepewnej i nieprecyzyjnej jest logika rozmyta. Dlatego z powodzeniem jest stosowana w algorytmach lokalizacji uszkodzeń do oceny wartości residuów oraz wnioskowania diagnostycznego.

Na rys. 10 pokazano ideę rozmytej oceny residuów. Parametry zbiorów rozmytych mogą być ustalane automatycznie na podstawie analizy statystycznych parametrów przebiegu danego residuum w stanie normalnym procesu lub ręcznie przez inżyniera systemu.

W systemie *AMandD* lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest na podstawie zbioru bieżących wartości sygnałów diagnostycznych oraz zapisanej w bazie wiedzy relacji między uszkodzeniami oraz symptomami (rys. 11) [1, 2]. Jest to prosty system oparty na regułach zapisywanych w postaci zbliżonej do języka naturalnego.



Rys. 10. Trójwartościowa rozmyta ocena wartości residuum



Rys. 11. Schemat algorytmu wnioskowania w module *iFuzzy-FDI*

Konfiguracja modułu lokalizacji uszkodzeń sprowadza się do wprowadzenia zbioru takich reguł. Samo wnioskowanie prowadzone jest według metody iDTS (*Industrial – Dynamic Table of States*) stanowiącej połączenie i uogólnienie metod DTS, F-DTS oraz T-DTS [1, 2] opracowanych w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej.

Metoda iDTS wykorzystuje logikę rozmytą do oceny residuów oraz wnioskowania diagnostycznego. Generowane diagnozy wskazują uszkodzenia wraz ze współczynnikami pewności ich wystąpienia.

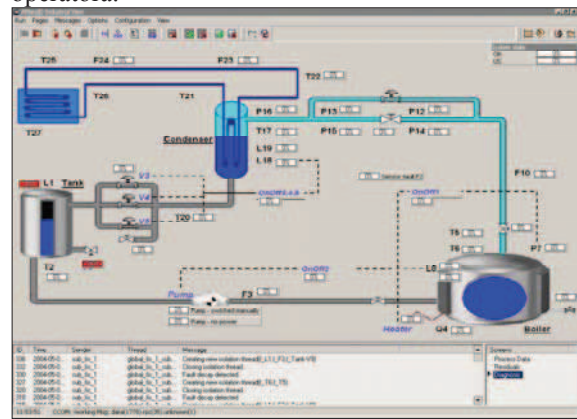
Do podstawowych zalet metody iDTS można zaliczyć:

- wykorzystanie logiki rozmytej do wielowartościowej oceny residuów oraz wnioskowania diagnostycznego, co pozwala na uwzględnienie różnego rodzaju niepewności,
- możliwość uwzględnienia opóźnień powstawania symptomów uszkodzeń w celu zwiększenia ich rozróżnialności oraz ograniczenia występowania fałszywych diagnoz,
- realizację wnioskowania szeregowo – równoległego, umożliwiającego formułowanie aktualnej diagnozy w każdym kroku wnioskowania,
- wykorzystanie dynamicznie tworzonych wątków diagnostycznych, co powoduje zmniejszenie możliwości wypracowania fałszywych diagnoz oraz umożliwia detekcję i lokalizację uszkodzeń krotnych,
- implementację dwupoziomowej struktury wnioskowania z możliwością wykorzystania dekompozycji obiektu,

- podawanie w wypracowanych diagnozach współczynnika pewności obecności wskazywanych uszkodzeń,
  - implementację automatycznej rekonfiguracji systemu wnioskowania w zależności od zbioru dostępnych zmiennych procesowych, wiarygodnych sygnałów diagnostycznych i stwierdzonych wcześniej uszkodzeń.
- Lokalizacja uszkodzeń w systemie *AMandD* prowadzona jest przez moduł *iFuzzy-FDI*.

2.7. Wizualizacja wyników diagnostowania

System *AMandD* jest przygotowany do dwustronnego sprzężenia z systemem automatyki. Oznacza to, że wypracowywane przez niego diagnozy mogą być prezentowane w systemie SCADA lub DCS na synoptykach procesu, wraz z bieżącymi wartościami pomiarów, co pozwala na utworzenie jednolitego środowiska pracy dla operatora.



Rys. 12. Schemat generatora pary z rozpoznanymi uszkodzeniami „wyciek ze zbiornika” lub „uszkodzenie toru pomiarowego L1”

W skład systemu *AMandD* wchodzi również własny moduł wizualizacji *InView*. Jego podstawowym zadaniem jest prezentacja uszkodzeń na schematach synoptycznych procesu oraz w odrębnym oknie diagnoz. Na schematach synoptycznych rozmieszczone są wskaźniki odpowiadające poszczególnym uszkodzeniom, na których wyświetlana jest wartość wskaźnika pewności istnienia danego uszkodzenia w zakresie 0-1 (rys. 12). Jeśli wartość wskaźnika jest wysoka, to słupki ilustrujący tę wartość ma kolor czerwony. Przy niższych wartościach przyjmuje on kolejno kolor fioletowy, żółty, a przy wartościach bliskich zera ma kolor biały.

Wizualizacja obejmuje ponadto:

- wykresy przebiegów zmiennych procesowych,
- zbiorcze wykresy przebiegów zmiennych procesowych rzeczywistych i modelowanych,
- wykresy przebiegów residuów, wskaźniki stanu residuów.

## 2.8. Wspomaganie decyzji operatorów

Na podstawie diagnoz system może dodatkowo wspomagać decyzje operatorów w stanach nienormalnych i awaryjnych. W fazie projektowania dla wszystkich lub niektórych uszkodzeń systemu mogą zostać opracowane strategie postępowania, które w czasie rzeczywistym po rozpoznaniu uszkodzenia wyświetlane są obsłudze razem z diagnozą. Strategie te mają postać dowolnych dokumentów przygotowanych wcześniej przez projektantów systemu, i mogą zawierać zarówno algorytm postępowania, jak i schematy uszkodzonych urządzeń czy też możliwości rekonfiguracji instalacji.

## 2.9. Inne zadania systemu

Omówione wcześniej moduły osiągnęły pełną funkcjonalność i mogą być wdrażane w praktyce. Niemniej jednak na nich nie kończą się możliwości samego systemu. Znajduje się on w stanie rozbudowy poprzez dołączanie nowych części realizujących dodatkowe zadania. Aktualnie rozwijane są w systemie *AMandD* moduły do:

- archiwizacja diagnoz,
- przesyłanie alarmów w sieci GSM,
- uzasadnianie diagnoz,
- generacja raportów diagnostycznych.

Ponadto możliwa jest również rozbudowa systemu o dodatkowe, specjalizowane moduły.

## 3. WŁASNOŚCI SYSTEMU AMandD

System *AMandD* jest dostosowany do modelowania i diagnozowania złożonych instalacji technologicznych. Z tego względu ma zaimplementowane mechanizmy pozwalające na rozwiązywanie problemów spotykanych w instalacjach wielkiej skali.

Moduł identyfikacji umożliwia maksymalnie autonomiczną pracę, pozwalając na szybkie uzyskiwanie modeli poszczególnych zmiennych procesowych bez dogłębnej i kosztownej analizy związków między nimi. W przypadku przetwarzania archiwów zawierających ogromne ilości pomiarów nieocenione są mechanizmy kompresji danych uczących dla modelu oraz wbudowane rozproszone środowisko obliczeniowe, znacznie zmniejszające czas potrzebny na identyfikację czy też dostrajanie modelu.

W złożonych instalacjach przemysłowych liczba możliwych uszkodzeń jest bardzo duża. Z tego względu system ma wbudowane mechanizmy dynamicznej i statycznej dekompozycji obiektu. Dla dużych obiektów istnieje możliwość rozdzielenia funkcji diagnostycznych na wiele równoległe pracujących jednostek komputerowych diagnozujących poszczególne części instalacji. W wielu przypadkach celowa jest także dodatkowa dekompozycja części procesu diagnozowanego

przez pojedynczy komputer na fragmenty diagnozowane przez odrębne zadania programowe. Zmniejsza to nakłady obliczeniowe i zwiększa niezawodność obliczeń. W trakcie wnioskowania w wydzielonych podsystemach stosowana jest tzw. strategia dynamicznej dekompozycji, której celem jest wyodrębnienie części obiektu z uszkodzeniem już na podstawie pierwszego zaobserwowanego symptomu. Stosowane podejście znacznie ułatwia rozpoznawanie uszkodzeń wielokrotnych (uszkodzeń różnych elementów występujących w tym samym czasie). Niezależnie od tego w systemie *AMandD* zastosowano własny oryginalny algorytm rozpoznawania uszkodzeń wielokrotnych.

Zastosowane w systemie rozwiązania umożliwiają ponadto:

- stałą rozbudowę w trakcie eksploatacji,
- uwzględnienie niepewności symptomów oraz relacji symptomy-uszkodzenia,
- stosowanie oprócz dwuwartościowej także wielowartościowej oceny residuów, w celu zwiększenia rozróżnialności uszkodzeń,
- prawidłowe wnioskowanie (automatyczna adaptacja) przy zmianach zbioru dostępnych sygnałów pomiarowych,
- możliwość automatycznego dostosowywania do zmian struktury obiektu (wyłączenia lub włączenia zespołów obiektu),
- uwzględnienie dynamiki rozprzestrzeniania się symptomów awarii (różne symptomy spowodowane wystąpieniem tego samego uszkodzenia pojawiają się niejednocześnie - nieuwzględnienie tego zjawiska może prowadzić do generowania fałszywych diagnoz).

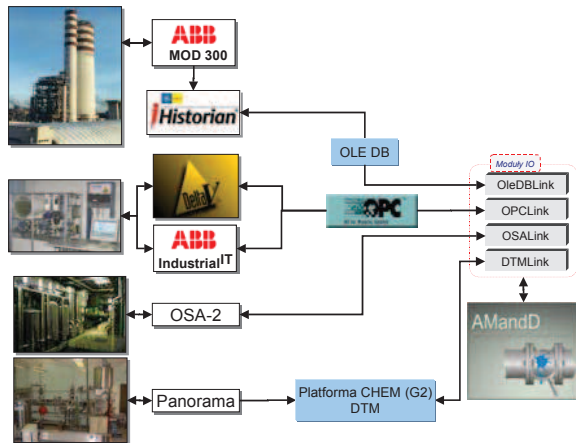
System *AMandD* wyposażony jest w algorytmy uwzględniające wymienione problemy, dzięki czemu diagnozowanie prowadzone jest efektywnie i skutecznie.

Na podstawie systemu *AMandD* mogą zostać opracowane specjalizowane rozwiązania, przystosowane do diagnozowania określonych klas obiektów, np. kotłów bloków energetycznych, zaworów regulacyjnych w instalacjach itp. Takie rozwiązania mogą w większym stopniu uwzględniać specyfikę obiektu i zapewniać łatwiejszą obsługę.

## 4. KOMUNIKACJA Z SYSTEMAMI AUTOMATYKI

System *AMandD* jest dostosowany do współpracy z różnymi zdecentralizowanymi systemami automatyki (DCS), jak również systemami nadzorowania i monitorowania procesów (SCADA) (rys.13). 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.

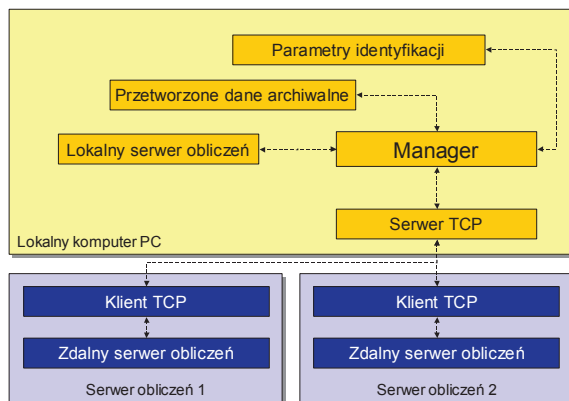




Rys. 13. Przykłady komunikacji systemu *AMandD* z zewnętrznymi systemami automatyki

## 5. ROZWIĄZANIA INFORMATYCZNE

System *AMandD* jest systemem rozproszonym, pracującym na standardowych komputerach PC pod kontrolą MS Windows. W jego skład wchodzi kilka modułów w postaci niezależnych programów bądź też serwisów systemu operacyjnego. Komunikacja między poszczególnymi modułami pracującymi *on-line* odbywa się przez wymianę komunikatów za pośrednictwem natywnego serwera komunikacyjnego *MRlaS* lub przy pomocy serwera MOM (Message Oriented Middleware) XML Blaster. Część *off-line* systemu służy głównie do jego konfiguracji. Jest to zestaw oddzielnych konfiguratorów opartych na koncepcji asystentów znanych z Windows. Całość charakteryzuje się wspólnym, jednolitym interfejsem użytkownika oraz wspólną bazą danych konfiguracyjnych.



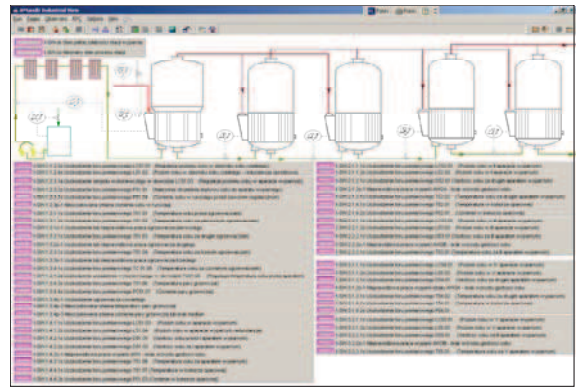
Rys. 14. Rozproszone środowisko obliczeniowe modułu *MITforRD*

Oprogramowanie służące do identyfikacji modeli umożliwia bezproblemową pracę z dużymi zbiorami danych, pochodzącymi z archiwów procesowych. Dodatkowo, udostępniane jest samokonfigurujące się rozproszone środowisko obliczeniowe (rys. 14), pozwalające na wykorzystanie wolnych mocy obliczeniowych klasycznych biurowych komputerów klasy PC. Oprogramowanie wykorzystuje technologię wtyczek. Ta cecha wraz

z otwartą architekturą oraz zastosowaną metodą komunikacji powoduje, iż system *AMandD* jest elastyczny i łatwy w rozbudowie oraz dostosowywaniu do konkretnych aplikacji.

## 6. PILOTOWE APLIKACJE

System *AMandD* został pilotowo wdrożony do diagnozowania części instalacji IDR w zakładzie produkcji mocznika w Zakładach Azotowych Puławy. W reaktorze R-R1 diagnozowane były tory pomiarowe temperatury mediów wpływających i wypływających z reaktora pomiaru temperatury w samym reaktorze. W kondensatorach E-E3 i E-E4 diagnozowane były przetworniki przepływu kondensatu parowego oraz zespoły wykonawcze. Testy przeprowadzono w lutym 2004 roku. Ich celem było sprawdzenie poprawności działania systemu oraz jego współpracy z systemem automatyki instalacji technologicznej IDR. Modele części procesu zostały opracowane na podstawie archiwalnych zmiennych procesowych zawierający zapis pracy instalacji technologicznej w stanie pełnej zdolności.



Rys. 15. Widok głównej synoptyki systemu diagnostycznego w Cukrowni Lublin

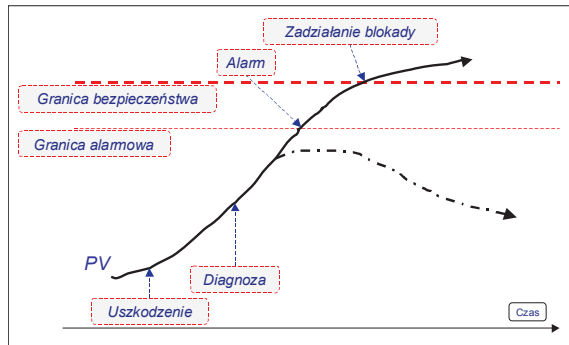
Prawidłowe działanie systemu zostało potwierdzone także podczas badań przeprowadzonych w laboratorium Uniwersytetu w Lille. System został wdrożony do diagnozowania instalacji generatora pary. Na rys. 12 widoczna jest wizualizacja uszkodzeń na schemacie instalacji.

W 2004 roku badania systemu były prowadzone również w cukrowni LUBLIN (rys. 15).

## 7. PODSUMOWANIE

Dokładne i szybko uzyskane diagnozy stwarzają możliwość przeprowadzenia niezbędnych akcji zabezpieczających. Systemy diagnostyczne stanowią zatem wraz z działaniami zabezpieczającymi drugi, wyższy poziom systemu zabezpieczeń procesu, podczas gdy klasyczne układy blokad technologicznych i standardowych układów zabezpieczeń stanowią pierwszy, niższy poziom systemu zabezpieczeń procesu. Wyższa warstwa zabezpieczeń procesu, dzięki dokładnej i szybko osiąganym informacji diagnostycznej, daje możliwość

redukcji lub eliminacji konsekwencji uszkodzeń (przebieg procesu oznaczony linią przerywaną na rys. 16).



Rys. 16. Przebiegi procesu w systemie bez diagnostyki i z diagnostyką

Umożliwia to uniknięcie zadziałania niższego poziomu zabezpieczeń, co w wielu przypadkach jest przyczyną zatrzymania przebiegu procesu lub niepotrzebnego ograniczenia jego wydajności.

Efektom zastosowania systemu diagnostycznego *AMandD* powinno być:

- zwiększenie bezpieczeństwa procesu dzięki szybkiej i dokładnej informacji o pojawiających się uszkodzeniach,
- zmniejszenie zagrożeń dla środowiska naturalnego,
- ograniczenie strat w stanach awaryjnych,
- ograniczenie kosztów obsługi remontowej
- eliminacja przeciążenia informacyjnego operatorów,
- zwiększenie pewności informacji w systemie automatyki (eliminacja błędów w wyliczanych wskaźnikach technicznych i ekonomicznych, bilansach itp. dzięki rozpoznawaniu uszkodzeń torów pomiarowych).

Zastosowanie systemu pozwala na realizację szeregu dodatkowych funkcji, jak przykładowo wirtualne sensory i analizatory czy też możliwość stworzenia symulatora procesu. Dzięki swojej elastyczności i łatwej rozbudowie z jednej strony, i szerokiej gamie algorytmów optymalizacyjnych, komunikacyjnych i wbudowanym mechanizmom charakterystycznym dla systemów eksperckich z drugiej, istnieje także możliwość łatwej implementacji przy jego pomocy szeregu zadań z dziedziny optymalizacji czy zarządzania procesem.

## LITERATURA

- [1] Korbicz, J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z. and Cholewa W. (2004). *Fault Diagnosis: Models, artificial intelligence methods, applications*. Springer.
- [2] Kościelny J. M. (2001). *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa.



Prof. dr hab. inż. **Jan Maciej KOŚCIELNY**, zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się problemami diagnostyki procesów przemysłowych, a szczególnie metodami detekcji i lokalizacji uszkodzeń przeznaczonymi

dla złożonych instalacji technologicznych oraz systemami diagnostycznymi. Autor ponad 180 publikacji naukowych. Kierował ponad 60 pracami badawczymi, w wyniku których m.in. opracowano i wdrożono w przemyśle systemy monitorowania i diagnostyki procesów. Jest członkiem International Editorial Board czasopisma naukowego *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* oraz redaktorem działowym czasopisma *Pomiary-Automatyka-Kontrola*.



Dr inż. **Michał SYFERT** od 2004 zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej na stanowisku adiunkta. Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczą głównie problemów projektowania algorytmów detekcji i lokalizacji uszkodzeń dla złożonych

i niepewnych systemów technicznych. Autor lub współautor 7 rozdziałów w monografiach oraz 44 artykułów (w tym 9 w czasopismach). Uczestnik trzech projektów badawczych Unii Europejskiej prowadzonych w zakresie diagnostyki elementów wykonawczych oraz procesów przemysłowych. Jeden z głównych autorów dwóch systemów diagnostycznych dla procesów przemysłowych: systemu DIAG i AMandD.



Dr inż. **Paweł WNUK** od 2005 roku zatrudniony w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej na stanowisku adiunkta. W pracy badawczej zajmuje się głównie identyfikacją modeli nieliniowych obiektów dynamicznych różnych

typów, ze szczególnym uwzględnieniem modeli rozmytych. Główny projektant i wykonawca oprogramowania identyfikacyjnego MITforRD, współautor systemu AMandD. Autor bądź współautor 22 publikacji w czasopismach naukowo-technicznych oraz na konferencjach. Interesuje się programowaniem rozproszonym, technikami sztucznej inteligencji, ruchem wolnego oprogramowania, fantastyką, amatorsko uprawia narciarstwo, tenis i squash.