

## ZASTOSOWANIE MODELI ODWROTNYCH DO DIAGNOZOWANIA STANÓW UTRATY CHŁODZENIA W REAKTORACH JĄDROWYCH TYPU WRZĄCEGO

Marcin BEDNARSKI\*, Wojciech CHOLEWA\*, Wiktor FRID\*\*

\*Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Polska  
E-mail: {mbednarski; wcholewa}@kpk.mt.polsl.gliwice.pl

\*\* Department of Nuclear Reactor Engineering, Royal Institute of Technology,  
Brinellvägen 60, SE-100 44 Stockholm, Sweden  
E-mail: wiktork@egi.kth.se

### Streszczenie

Celem referatu jest pokazanie przykładu zastosowania odwrotnych modeli diagnostycznych. Zapobieganie wypadkom w elektrowniach jądrowych, w szczególności przypadkom uszkodzenia rdzenia, gdzie ryzyko uwolnienia produktów radioaktywnych jest największe, jest sprawą priorytetową dla bezpieczeństwa. W celu analizy potencjalnie możliwych wypadków, jak również w celu ich zapobiegania oraz zarządzania nimi, stworzono wiele programów symulacyjnych oraz systemów wspomagających podejmowanie decyzji (Computerized Decision Support Systems – CDSS [4][5]) przez operatorów. Bazują one na metodach deterministycznych i probabilistycznych. W przypadku reaktorów jądrowych rozwój szybkich narzędzi symulacyjnych daje możliwość zastosowania metod diagnostycznych bazujących na przykładach. Przedstawione tutaj lokalne modele odwrotne są przykładem takiego właśnie podejścia.

Słowa kluczowe: modele odwrotne, reaktor jądrowy

## APPLICATION OF INVERSE MODELS TO DIAGNOSTICS OF LOSS OF COOLANT ACCIDENTS IN BOILING WATER NUCLEAR REACTORS

### Summary

Aim of this paper is to present example of application inverse diagnostic models. Accident prevention in nuclear plants, in particular in case of the core damage, where the risk of release radioactive products is the highest, is the priority cause for safety. In order to analyze potentially possible accidents and also to prevent and to manage them, a lot of simulation codes and Computerized Decision Support Systems (CDSS [6][7]) was implemented. They base on deterministic and probabilistic methods. In case of nuclear reactors, recent progress of very fast simulation tools opens possibility of applying case-based diagnostic methods. The method described in the paper, which uses local inverse models, is an example of such approach.

Key words: inverse models, nuclear reactor

### 1. ISTOTA DZIAŁANIA REAKTORÓW JĄDROWYCH

Elektrownia jądrowa, podobnie jak konwencjonalna elektrownia ciepła wytwarza energię elektryczną zamieniając w turbinie, napędzającej generator, część energii zawartej w parze na energię mechaniczną (Rys.1). Różnica polega na tym, że ciepło potrzebne do wytworzenia pary uzyskuje się nie ze spalania paliw organicznych a z reakcji rozszczepienia jąder uranu lub plutonu. Reaktor jądrowy jest zatem odpowiednikiem kotła w elektrowni konwencjonalnej. [10]

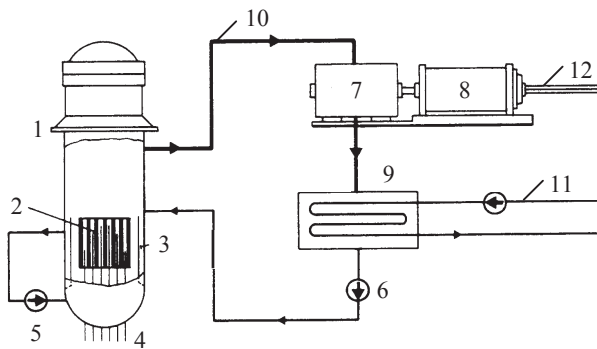
Obudowa bezpieczeństwa jest szczelnym budynkiem otaczającym reaktor i podstawowe układy. Spełnia ona wiele ważnych funkcji podczas normalnej pracy oraz podczas nieprzewidzianych

wypadków. Jej zadaniem jest zapobieganie wydostawaniu się substancji radioaktywnych w przypadku awarii. Obudowa ma także na celu ochronę reaktora przed czynnikami zewnętrznymi [10]. Rys.8 przedstawia schemat takiej obudowy.

### 2. MODEL ODWROTNY

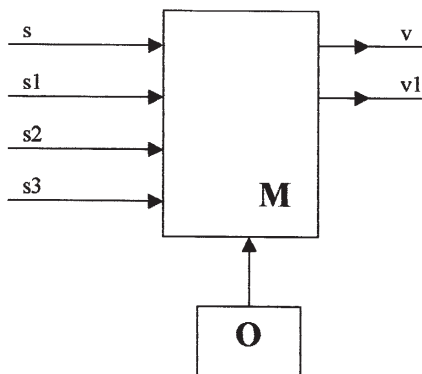
Na obecnym etapie rozwoju komputerowych systemów, wspomagających diagnostykę maszyn i procesów, wyłoniła się pilna potrzeba opracowania skutecznych ogólnych algorytmów, pozwalających na identyfikację relacji diagnostycznych będących podstawą określania reguł, tworzących bazy wiedzy diagnostycznych systemów doradczych. Reguły takie mają wskazywać możliwe przyczyny obserwowanych skutków. Niestety, często brak jest

dokładnej wiedzy diagnostycznej oraz niezawodnych jej źródeł.



Rys. 1. Schemat reaktora typu BWR (Boiling Water Reactor): 1 – Zbiornik reaktora, 2 – Rdzeń, 3 – Dolna komora, 4 – Pręty regulacyjne, 5 – Główne pompy recyrkulacyjne, 6 – Pompa obiegu wodnego, 7 – Turbina, 8 – Generator, 9 – Kondensator pary, 10 – Para, 11 – Woda chłodząca, 12 – Energia elektryczna. [10]

Nową zaproponowaną w [5] metodą identyfikacji relacji diagnostycznych, stosowanych do określania reguł w diagnostycznych systemach doradczych jest odwracanie numerycznych modeli rozpatrywanych obiektów technicznych.



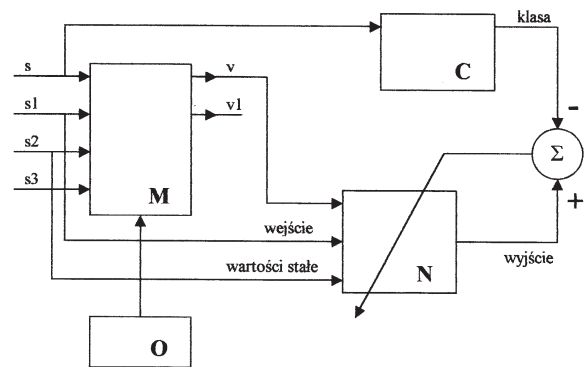
Rys.2. Model M określony dla obiektu O [3]

- s – wartości poszukiwane
- s1 – znane wartości zmienne określające warunki działania obiektu
- s2 – znane wartości stałe
- s3 – wartości trudne do oszacowania i pomiaru
- v – znane wartości, będące skutkiem działania obiektu
- v1 – nieznane lub pomijane wartości, będące skutkiem działania obiektu

Koncepcja odwracania modeli opiera się na założeniu, że znany jest model numeryczny M

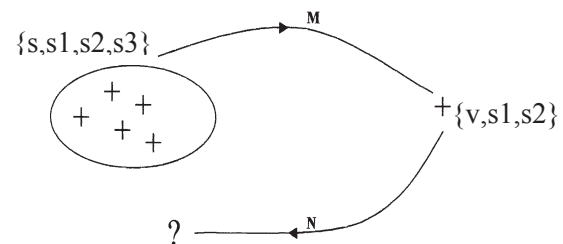
(rys.2), który pozwala na wyznaczenie wartości wyjść  $\{v, v1\}$  dla zadanego zbioru wejść  $\{s, s1, s2, s3\}$ .

Model M opisuje relację przyczynowo-skutkową pomiędzy wejściami – przyczynami  $\{s, s1, s2, s3\}$ , a wyjściami – skutkami  $\{v, v1\}$ . W wyniku odwracania modelu M (rys.3) chcemy otrzymać model odwrrotny N, który pozwoli na wyznaczenie nieznanymi poszukiwanymi wartości  $\{s\}$ , na podstawie znanych, otrzymanych w wyniku pomiaru lub symulacji wartości  $\{v, s1\}$ . [3]



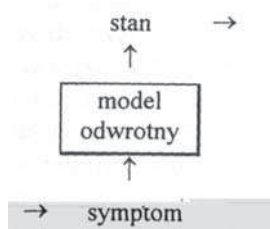
Rys.3. Wyznaczanie modelu odwrrotnego N z zastosowaniem klasyfikatora [3]

Z punktu widzenia relacji przyczynowo-skutkowych wartości  $\{s, s1, s2, *\}$  opisują wyłącznie wybrane przyczyny, a wartości  $\{v, *\}$  wybrane ich skutki. Na podstawie tego można przypuszczać, że dokładny model odwrrotny nie istnieje (zadanie może nie posiadać rozwiązania – rys.4). Dlatego ograniczamy dokładność poszukiwanego modelu odwrrotnego, zakładając, że będzie on wyznaczał jedynie klasy wartości parametru v. [3]



Rys.4. Brak rozwiązania dla zadania odwracania modelu [3]

Wyjściową fazą badań jest budowanie złożonych, numerycznych modeli symulacyjnych, pozwalających na generowanie sygnałów odpowiadających złożonym stanom technicznym obiektu. Modele te weryfikowane są na obiektach rzeczywistych oraz na stanowiskach laboratoryjnych. Na podstawie zweryfikowanych modeli wyznaczane są następnie modele odwrótne, reprezentujące poszukiwane relacje diagnostyczne, przekształcające symptomy diagnostyczne w klasy stanów technicznych (rys.5) [2][3].



Rys.5. Istota modelu odwrotnego [3]

Prostym sposobem wyznaczenia modeli odwrotnych jest zastosowanie algorytmów interpolacyjnych pozwalających na wyznaczenie przybliżonej wartości  $\hat{y}(x)$  funkcji  $y(x)$  dla dowolnego argumentu  $x$ , na podstawie przykładów wartości tej funkcji [3],

$$\{y(x_p) : x_p \in X_p\} \tag{1}$$

znanych dla skończonego zbioru przykładów wartości argumentów,

$$X_p = \{x_p\} \tag{2}$$

**2.1. Algorytmy odwracania modeli**

W [3] i [4] zaproponowano kilka klas algorytmów, które mogą być zastosowane do odwracania modeli numerycznych. Przykłady algorytmów reprezentujących te klasy oznaczono symbolami W11, W12, W13. Należy podkreślić, że algorytmy te są jedynie przykładami bardzo licznego zbioru algorytmów szczegółowych.

• Algorytm W11

Wartości funkcji  $y(x)$  dla dowolnego  $x$  wyznaczone są jako średnie ważone znanych przykładów wartości funkcji,

$$y(x) = \frac{\sum_{x_i \in \varepsilon(x)} v(x, x_i) y(x_i)}{\sum_{x_i \in \varepsilon(x)} v(x, x_i)} \tag{3}$$

gdzie  $\varepsilon(x)$  jest ograniczonym otoczeniem punktu (elementu)  $x$  w przestrzeni wartości argumentów funkcji  $y(x)$  oraz gdzie funkcja  $v(x, x_i)$  jest funkcją wagi, której wartości zmniejszają się w miarę oddalania się od punktu  $x$ , np. (rys.6) [3].

$$v(d(x, x_i)) = \exp(-ad^b(x, x_i)) \tag{4}$$

• Algorytm W12

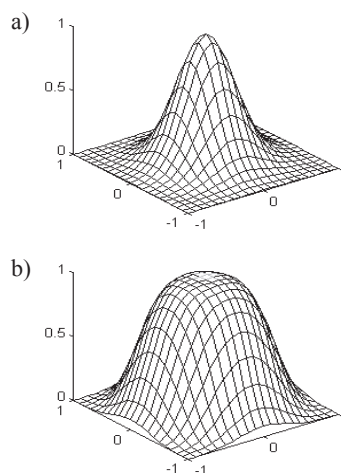
Algorytm ten polega na wyznaczeniu modelu lokalnego, liniowego ze względu na współczynniki, identyfikowanego w bezpośrednim otoczeniu wyróżnionego punktu, dla którego poszukiwany jest ten model. Identyfikacja takiego modelu lokalnego

następuje na podstawie odpowiedniej liczby najbliższych sąsiadów wyróżnionego punktu (rys.7) [3].

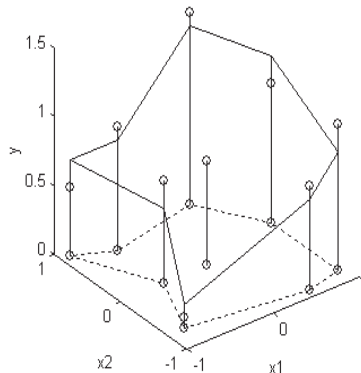
• Algorytm W13

Jest modyfikacją algorytmu W12. W algorytmie tym wprowadzono dodatkową funkcję oceniającą stopień ważności danych w celu zwiększenia wpływu bezpośrednich sąsiadów [3]. Funkcja ta może występować w różnych wersjach:

- przyjmuje stałe wartości 1
- zależy od odległości elementów i przyjmuje wartość maksymalną dla zerowej odległości elementów (rys.6).



Rys.6. Przykład funkcji wagi (4) w dwu wymiarowej przestrzeni. a) a=10. b=1: b) a=10. b=2



Rys.7. Identyfikacja lokalnego modelu liniowego

**3. DIAGNOSTYKA STANÓW UTRATY CHŁODZENIA**

Stany (wypadki) utraty chłodzenia w reaktorach jądrowych oznaczane są terminem LOCA (loss of coolant accidents)

Wyznaczenie modelu odwrotnego do diagnostyki wypadków utraty chłodzenia wymagało wykonania następujących kroków:

- Analiza obiektu i wybór rozpatrywanych trenujących i testujących sekwencji zdarzeń.

- Analiza obiektu i wybór najlepszych sygnałów diagnostycznych, gdzie założono, że wybór sygnałów powinien być połączony z wyborem odpowiednich cech tych sygnałów.
- Symulacja wybranych sekwencji trenujących i testujących w ramach eksperymentu numerycznego.
- Odwracanie i testowanie modelu.

### 3.1. Wybór sekwencji trenujących i testujących

Przyjęto, że zbiór rozpatrywanych sekwencji dla wypadków utraty chłodzenia reaktora jest iloczynem kartezjańskim następujących stanów elementarnych [1]:

- uszkodzenie rury wodnej (brak, małe, średnie, duże)
- uszkodzenie rury parowej (brak, małe, średnie, duże)
- przeciek przez przegrodę (mały, średni, duży)
- uszkodzenie systemów bezpieczeństwa (brak, uszkodzone 2 pompy z 4 – 50%, pełne uszkodzenie – 100%)

Wyboru powyższych stanów elementarnych dokonano w oparciu o:

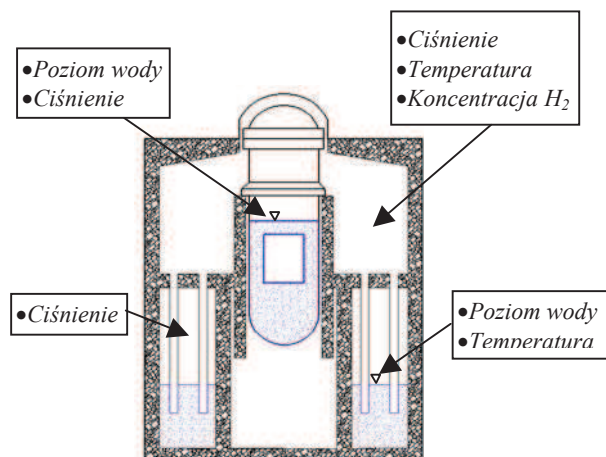
- analizy PSA (Probabilistic Safety Analysis) [8],
- rozmowy ze specjalistami w zakresie analizy PSA w elektrowni Forsmark,
- kryterium doboru zakresu ewentualnego zastosowania modelu,
- kryterium dotyczące bezpieczeństwa,

Zbiór rozpatrywanych sekwencji zawiera 36 sekwencji testujących i 12 sekwencji trenujących.

### 3.2. Sygnały diagnostyczne

Wybrane sygnały zostały przedstawione na rysunku 8.

Cechą sygnałów w każdym przypadku jest ich amplituda.



Rys.8. Schemat obudowy bezpieczeństwa z naniesioną lokalizacją źródeł sygnałów [1]

### 3.3. Symulacja sekwencji trenujących i testujących

Symulacje sekwencji przeprowadzono stosując program MAAP4 (Modular Accident Analysis Program)[9], który został stworzony przez FAI (Fauske & Associates, Inc.).

W wyniku symulacji otrzymano przebiegi 8 sygnałów (rys.8) w dziedzinie czasu (0-4000s) dla każdej z 36 sekwencji trenujących (wzorcowych) i 12 sekwencji testujących, gdzie czas 0s określa chwilę zmiany stanu.

### 3.4. Modyfikacja cech sygnałów

Modyfikacji cech sygnałów dokonano w celu dodania informacji o historii sygnałów i redukcji szumu. Polegała ona na:

- ograniczeniu rozpatrywanych danych do okresu od 0 do 300s,
- przekształceniu danych, w celu uzyskania stałej częstotliwości próbkowania 0,2 Hz, realizowanym za pomocą algorytmu interpolacyjnego bazującego na funkcjach sklepanych (spline functions),
- uzupełnieniu nowych danych przez dopisanie na początku każdego ciągu odpowiedniego ciągu dodatkowych wartości stałych, poprzedzających zmianę stanu i odpowiadających wartości początkowej, o długości 100s (ostatecznie rozpatrywany jest odcinek czasu od -100s do 300s).
- dla każdej sekwencji zbiór rozpatrywanych (zmodyfikowanych) danych (8 cech sygnałów) uzupełniony został o wartości będące nośnikami informacji o historii zmian, otrzymane w wyniku całkowania sygnałów wg wzoru (5)

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) d\tau \quad (5)$$

gdzie:

$$T=250s$$

$x(\tau)$  – zmodyfikowany sygnał.

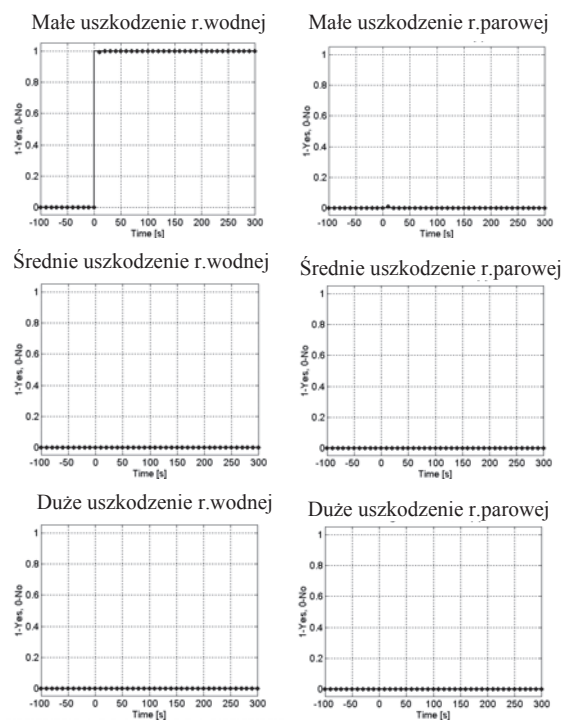
W wyniku opisanych działań otrzymano sekwencje zawierające po 16 cech sygnałów.

### 3.5. Testowanie modelu odwrotnego

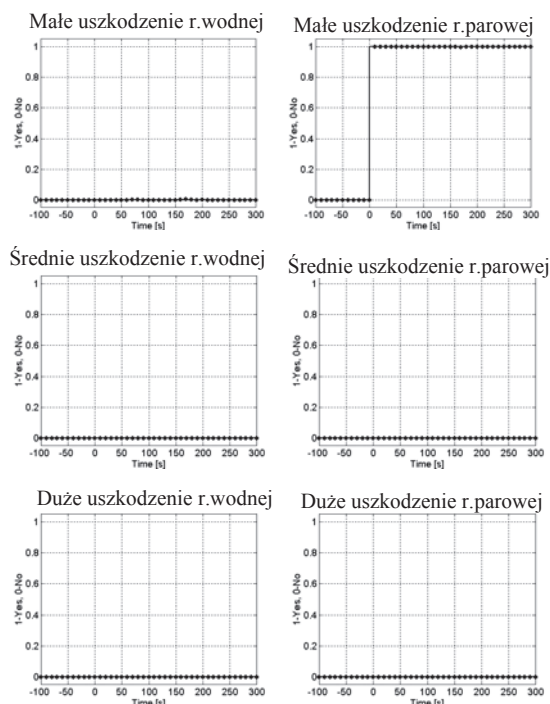
Omawiany model został tak wyznaczony aby wyjściem były wartości logiczne, które reprezentują występowanie uszkodzenia (0 – oznacza NIE, uszkodzenia nie wystąpiło; 1 – oznacza TAK, uszkodzenie wystąpiło).

Przykłady wybranych wyników dla symulowanych uszkodzeń rury wodnej lub parowej zostały przedstawione na rys.9 i rys.10 Linie ciągłe obrazują wartości oczekiwane, natomiast '♦' przedstawiają wartości wyjścia z modelu odwrotnego.





Rys.9. Przykład wyników dla sekwencji 'małe uszkodzenie rury wodnej' [1]

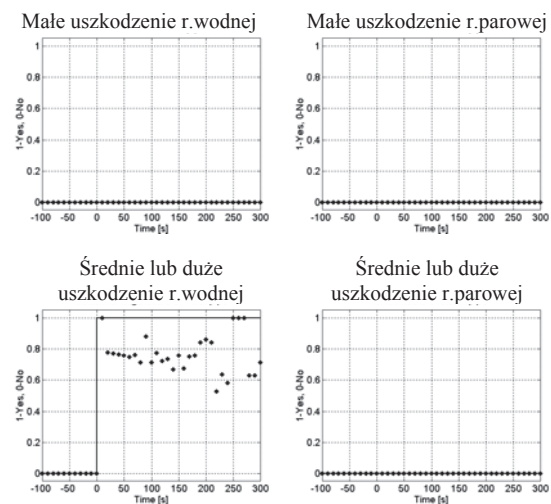


Rys.10. Przykład wyników dla sekwencji 'małe uszkodzenie rury parowej' [1]

Z wykresów widać, że możliwe jest bezbłędne rozpoznanie rodzaju symulowanego uszkodzenia (uszkodzenie rury wodnej lub parowej) i jego wielkości (małe uszkodzenie).

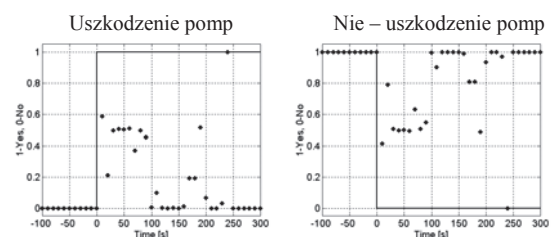
Następny przykład przedstawia wybrane wyniki dla symulowanego uszkodzenia rury wodnej (rys.11), gdzie wielkość uszkodzenia została

przyjęta blisko granicy klas (pomiędzy średnim lub dużym). Model odwrotny konsekwentnie klasyfikuje je błędnie do jednej klasy. Uznano, że sytuacja ta spowodowana jest tym, iż nie przedstawiono modelowi przykładów (danych wzorcowych) z rozpatrywanego w czasie testowania przedziału. W celu uzasadnienia tego przypuszczenia przedstawiono wykres, na którym wprowadzono zamiast dwóch klas – średnie i duże uszkodzenie, jedną klasę – średnie lub duże uszkodzenie rury wodnej. Dane te są poprawnie klasyfikowane.



Rys.11. Przykład wyników dla sekwencji 'średnie lub duże uszkodzenie rury wodnej' [1]

Ostatni przykład (rys.12) przedstawia wyniki symulacji uszkodzenia 2 pomp w systemach bezpieczeństwa. Model nie potrafi rozpoznać uszkodzenia pomp, gdyż objawy takiego uszkodzenia są bardzo podobne do przypadku gdzie wszystkie pompy są sprawne. Jest to związane z faktem, że systemy bezpieczeństwa zbudowane są tak aby uszkodzenie jednego bądź kilku komponentów (elementy nadmiarowe) nie prowadziło do awarii, gdzie skutkiem byłaby utrata chłodzenia rdzenia, co w rezultacie prowadziłoby do uwolnienia produktów radioaktywnych. W tym przypadku dwa obiegi systemów bezpieczeństwa (dwie działające pompy z czterech pomp zainstalowanych) są w stanie poradzić sobie z awarią utraty chłodzenia (program MAAP4 symuluje takie przypadki).



Rys.12. Przykład wyników dla sekwencji 'uszkodzenie pomp' [1]

#### 4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu odwracania modeli numerycznych w zastosowaniu do reaktora jądrowego uzyskano zadowalające rezultaty, uzasadniające celowość dalszego badania i rozwoju tych algorytmów w tym zakresie.

Możliwość zastosowania odwrotnych modeli numerycznych jest ściśle związana z rozwojem programów symulacyjnych. W przypadku reaktorów jądrowych ta dziedzina jest bardzo szeroko rozwinięta, co pozwala na wyznaczanie modeli odwrotnych.

Zastosowanie modeli odwrotnych wymaga dużego nakładu mocy obliczeniowej, zarówno do generowania danych uczących (program symulujący obiekt) jak i do procesu odwracania modelu obiektu. Na obecnym etapie rozwoju komputerów jest to jednak coraz mniejszym problemem.

Otrzymane wyniki wskazują na poprawność zastosowania odwrotnych modeli diagnostycznych i wyznaczają drogę dalszego rozwoju tego typu systemów. Pozwala to przypuszczać, że w przyszłości będzie istnieć możliwość wdrożenia tych systemów do zastosowań w dziedzinie przemysłu jądrowego.

#### 5. LITERATURA

- [1] Bednarski M.: *Application of inverse models in the diagnostics of nuclear reactors*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice i Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [2] Cholewa W.: *Genetic Approach to Inverse Diagnostic Modelling*. PPAM'99, Kazimierz Dolny, 1999, Proceedings 510-524.
- [3] Cholewa W., Kiciński J.: *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [4] Cholewa W., Kiciński J.: *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn – Politechnika Śląska. Zeszyt 120. Gliwice 2001.
- [5] Cholewa W., White M. F.: *Inverse modelling in rotordynamics for identification of unbalance distribution*. Machine Vibration. (1993).
- [6] Frid W.: *Nuclear power plant safety assessment and accident management: Practice in Sweden and computerized decision support systems*. Journal of Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol.9, No.1, 2002.
- [7] Frid W.: *Some Examples of Recent Developments in Computerised Systems for Plant Status Assessment and Accident Management*. KARNTEKNIK 2000. Arlandia, 29–30 November 2000.
- [8] Hauptmanns U., Werner W.: *Engineering Risks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1991.
- [9] *Modular Accident Analysis Program MAAP4*: www.maap4.com.
- [10] Pershagen B.: *Light Water Reactor Safety*. Pergamon Press, 1996.



**Marcin Bednarski** ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w 2001 roku uzyskując stopień magistra w zakresie mechaniki i budowy maszyn. W tym samym roku rozpoczął dzienne studia doktoranckie w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Obecnie prowadzi badania dotyczące systemów doradczych opartych na sieciach bayesowskich.



**Wojciech Cholewa** jest profesorem zwyczajnym w Politechnice Śląskiej, gdzie kieruje Katedrą Podstaw Konstrukcji Maszyn. Jego zainteresowania badawcze związane są z budową i eksploatacją maszyn i dotyczą diagnostyki technicznej oraz zastosowań metod i technik

sztucznej inteligencji w systemach diagnostycznych i monitorujących. Jest autorem publikacji omawiających metody analizy sygnałów, metody wnioskowania przybliżonego i reprezentacji wiedzy przybliżonej oraz dynamiczne systemy doradcze. Opracował wiele zastosowań informatyki w diagnostyce technicznej. Wypromował dziewięciu doktorów nauk technicznych.



**Dr Wiktor Frid** jest profesorem w Instytucie Inżynierii Reaktorów Jądrowych w Królewskim Uniwersytecie Technicznym w Sztokholmie. Pracuje również w Szwedzkim Inspektoracie Energii Jądrowej, gdzie zajmuje się zarządzaniem wypadkami i prowadzi związane z tym badania.

Był kierownikiem wieloletniego skandynawskiego projektu badawczego zajmującego się porównaniem metod i rozwojem oprogramowania stosowanego do analizy bezpieczeństwa reaktorów jądrowych. Koordynował projekt SARA (Severe Accident Recriticality Analyses) objęty 4-tym Programem Ramowym Unii Europejskiej.