

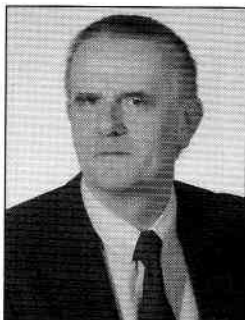
**Wojciech CHOLEWA**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

**Tablice ogłoszeń w diagnostycznych systemach doradczych**

**Prof. dr hab. inż. Wojciech CHOLEWA** – profesor zwyczajny, kierownik Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej. Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetycznego Politechniki Śląskiej (1971). Doktorat (1974) i habilitacja (1983) związane z diagnostyką techniczną. Stypendysta Fundacji A.v.Humboldta (1983/84). Przewodniczący Zespołu Diagnostyki SPE KBM PAN. Specjalizuje się w zastosowaniach informatyki do wspomagania procesów projektowania, wytwarzania i eksploatacji maszyn.



Opracowanie dotyczy dynamicznych systemów doradczych. Główną cechą proponowanej modyfikacji znanej koncepcji tablic ogłoszeń jest zastosowanie sieci współwystępujących i związanych węzłów zawierających aktywne stwierdzenia dynamiczne dążące do uzyskania stanu równowagi. Wszystkie rozpatrywane stwierdzenia gromadzą swoją historię i mogą zmieniać swoje wartości w funkcji czasu.

**ABSTRACT**

The paper deals with real-time expert systems. The main feature of proposed modification of well known blackboards is the application of a net of coexisting and related nodes containing active statements looking for an equilibrium state. All statements collect their history and may change their values with time.

**Wprowadzenie**

Szybki rozwój systemów diagnozowania złożonych obiektów i procesów technologicznych, spowodowany między innymi koniecznością minimalizacji stopnia ryzyka związanego z ich stosowaniem, wywołał potrzebę racjonalizacji metod wnioskowania o stanie technicznym. Istniejące obecnie możliwości wyznaczenia wielu wartości różnych cech sygnałów diagnostycznych oraz możliwości dalszego ich przetwarzania doprowadziły do znaczącego wzrostu liczby rozpatrywanych symptomów diagnostycznych. Bardzo duża liczba danych wejściowych do procesu wnioskowania o stanie technicznym (np. rzędu kilku tysięcy danych dla turbopozostu energetycznego) uzasadnia celowość stosowa-

nia odpowiednich narzędzi wspomagających proces wnioskowania [14, 28]. Narzędziami takimi są między innymi systemy doradcze [9], nazywane również systemami ekspertowymi [24] lub eksperckimi [10].

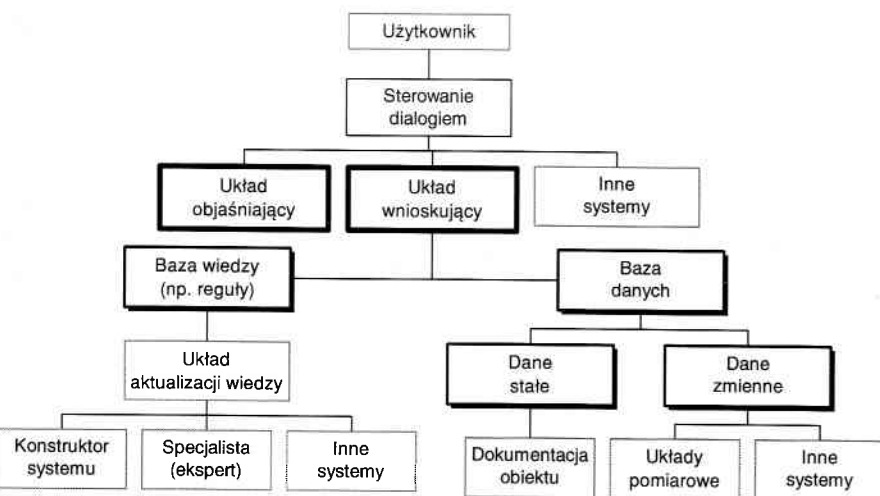
Prace dotyczące systemów doradczych zostały zainicjowane, około 30 lat temu, w Stanford University i były rozwijane początkowo głównie w takich ośrodkach, jak: Carnegie-Mellon University, Massachusetts Institute of Technology oraz Stanford Research Institute. Zainteresowanie tymi systemami stale rośnie. Oczekuje się, że systemy te znajdą powszechne i skuteczne zastosowania w diagnostyce technicznej. Obecnie prace badawcze związane z konstruowaniem i stosowaniem systemów doradczych są prowadzone w wielu ośrodkach w Polsce.

**Systemem doradczym** przyjęto nazywać program komputerowy przeznaczony do rozwiązywania specjalistycznych zadań, które wymagają profesjonalnej wiedzy i doświadczenia w stosowaniu tej wiedzy (zbadanie i rozwiązanie zadania) na poziomie trudności pokonywanych przez człowieka-specjalistę. Systemy doradcze, dysponując zapisaną wiedzą specjalisty z wybranej dziedziny, mogą ją stosować wielokrotnie w sposób ekonomicznie efektywny. Pozwala to jednocześnie doradcy (człowiekowi) uwolnić się od powtarzania analogicznych działań (ekspertyz) i zająć się bardziej twórczymi zadaniami. Szczególną zaletą takich systemów jest możliwość rozwiązywania określonych zadań bez bezpośredniego udziału specjalisty, jak również możliwość agregacji w jednym systemie wiedzy licznych zespołów specjalistów.

Zadania wspomagane przez większość istniejących systemów doradczych obejmują głównie interpretację, predykcję, diagnozowanie, monitorowanie i instruowanie. Diagnostyczne systemy doradcze są przeznaczone przede wszystkim do:

- wspomaganie działań związanych z wnioskowaniem diagnostycznym, czyli wnioskowaniem o stanie technicznym obiektu na podstawie cech sygnałów diagnostycznych;
- generowania objaśnień zawierających odpowiedzi na pytania: „z czego wynika?”, „do czego potrzebne?”, „co by było gdyby?”;
- częściowego wspomaganie procesów pozyskiwania wiedzy (na potrzeby tych systemów).

Mogą być rozpatrywane dwie kategorie diagnostycznych systemów doradczych:



Rys. 1. Główne elementy statycznego systemu doradczego

• pierwsza z nich to systemy statyczne, charakteryzujące się tym, że najczęściej działają one w tzw. trybie *off-line* i wspomagają poszukiwanie rozwiązania w stałym otoczeniu;

• druga kategoria to systemy dynamiczne, działające najczęściej w trybie *on-line*, w zmieniającym się otoczeniu.

Niezależnie od rozróżniania systemów statycznych i dynamicznych, konieczne jest rozpatrywanie systemów o nieograniczonym dopuszczalnym czasie działania (poszukiwania rozwiązania) oraz systemów o ograniczonym i gwarantowanym (nie przekraczającym dopuszczalnego) czasie wnioskowania. Obie te kategorie mogą występować zarówno dla systemów statycznych, jak i systemów dynamicznych.

Podstawowym elementem większości systemów doradczych jest **układ wnioskujący** (rys. 1) współdziałający z odpowiednimi bazami danych [5, 22]. Przyjęte zasady jego działania określają klasę systemu doradczego. O możliwości zastosowania systemu decyduje jakość przeprowadzonego procesu pozyskiwania wiedzy [23]. W ostatnim okresie wzrasta znaczenie modeli diagnostycznych [12, 20], definiowanych dla rozpatrywanych obiektów. O przydatności systemu często w praktyce decyduje działanie **układu objaśniającego** oraz **układu sterującego dialogiem**.

Celowość stosowania systemów doradczych w diagnostyce technicznej obecnie nie jest kwestionowana. Przykładów poważnych zastosowań takich systemów jest jednak niewiele. Przyczyną tego stanu są prawdopodobnie znaczące trudności, jakie występują podczas konstruowania takich systemów dla zastosowań w tzw. czasie rzeczywistym, charakteryzujących się tym, że:

• kontekst, w ramach którego jest prowadzony proces wnioskowania, nie jest stały i przesłanki są funkcjami czasu;

• proces wnioskowania nie jest procesem monotonicznym, tzn. zwiększanie zbioru uznanych przesłanek może prowadzić do zmian wcześniej wyznaczonych konkluzji.

Rozpatrywanymi w literaturze strategiami działania systemów doradczych są głównie strategie określane jako procesy wnioskowania sterowane przez dane oraz sterowane przez cel wnioskowania. Dla systemów dynamicznych uzasadnione jest dodatkowe rozróżnienie systemów działających cyklicznie oraz systemów formułujących odpowiedź na zapytanie użytkownika.

## Stwierdzenia

Literatura dostarcza wiele przykładów różnych modeli systemów doradczych. Dla rozpatrywanej klasy systemów dynamicznych, przeznaczonych do ciągłego lub cyklicznego interpretowania danych, bardzo przydatne są modele bazujące na pojęciu stwierdzenia.

**Stwierdzenie** jest informacją o uznaniu wypowiedzi orzekającej o obserwowanych faktach lub reprezentującej określoną opinię. Można przyjąć, że ogólną reprezentacją stwierdzenia jest następująca szóstka uporządkowana

$$\langle o, a, v, w, t, b \rangle \quad (1)$$

gdzie:

$o, a, v$  – treść stwierdzenia, czyli wypowiedź o tym, że obiektowi  $o$  przysługuje atrybut  $a$  o wartości  $v$ ;

$t$  – czas, w którym jest rozpatrywany obiekt  $o$  (chwila lub odcinek czasu);

$b$  – ocena stopnia prawdziwości lub stopnia przekonania o prawdziwości wypowiedzi  $o, a, v$  w czasie  $t$ ;

$w$  – waga (stopień ważności) stwierdzenia; może być na przykład podstawą porządkowania komunikatów wysyłanych do użytkownika systemu doradczego.

Funkcje zwracające wartości odpowiednich elementów szóstki uporządkowanej (1) odpowiadającej stwierdzeniu  $x$  będą zapisywane następująco

$$o(x), a(x), v(x), w(x), t(x), b(x) \quad (2)$$

Stwierdzenie może być rozpatrywane jako uogólnienie pojęcia **zdanie**, stosowanego w rachunku zdań, gdzie rachunek zdań dotyczy tylko takich wypowiedzi, o których potrafimy orzec czy są prawdziwe, czy fałszywe. Uogólnienie związane ze stwierdzeniem dopuszcza między innymi możliwość rozpatrywania wypowiedzi, o których nie potrafimy jednoznacznie powiedzieć czy są prawdziwe, czy fałszywe.

Treścią stwierdzenia jest wypowiedź orzekająca o obserwowanych faktach lub reprezentująca określoną opinię. Wypowiedź ta jest reprezentowana przez następujące elementy składowe stwierdzenia  $x$

$$\langle o(x), a(x), v(x) \rangle \quad (3)$$

Należy wyraźnie podkreślić, że wprowadzone pojęcie **stwierdzenie** nie ma stanowić alternatywy dla pojęcia **zdanie** i nie będą podejmowane próby przekształcania rachunku zdań (w którym jest pomijana treść i interpretacja znaczenia zdań) w rachunek stwierdzeń, których treść jest zadawana jawnie (3). W celu ograniczenia nadmiarowości danych i ograniczenia ilości pamięci niezbędnej do rejestrowania zmieniających się stwierdzeń są stosowane słowniki treści stwierdzeń.

Wartość  $b(x)$  stwierdzenia  $x$  jest miarą akceptacji wypowiedzi (3). Najprostszym sposobem definiowania wartości  $b(x)$  stwierdzeń  $x$  jest stosowanie stałych logicznych YES, NO (tak, nie)

$$b(x) \in \{\text{YES}, \text{NO}\} \quad (4)$$

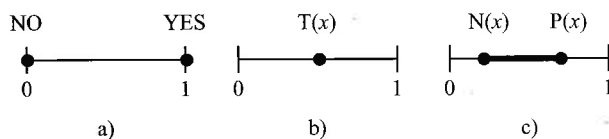
Prowadzi to bezpośrednio do klasycznego rachunku zdań. Diagnostyczne systemy doradcze wymagają jednak stosowania stwierdzeń przybliżonych oraz niepewnych. Znanych jest wiele sposobów reprezentowania takich stwierdzeń (np. [8, 13, 21, 26, 29]).

Prostym podejściem formalnym jest zastosowanie rachunku prawdopodobieństwa oraz znanego ogólnie modelu Bayesa. Wymaga to przyjęcia umowy, że wartością stwierdzenia  $x$  będzie prawdopodobieństwo  $p(x)$  prawdziwości wypowiedzi (3) stanowiącej treść stwierdzenia (1)

$$b(x) = p[\langle o(x), a(x), v(x) \rangle] \in [0, 1] \quad (5)$$

Uogólnieniem tego podejścia jest przyjęcie założenia, że wartością stwierdzenia  $x$  jest jego stopień prawdziwości  $T(x)$  będący liczbą rzeczywistą z przedziału  $[0, 1]$ .

$$b(x) = T(x) \in [0, 1] \quad (6)$$



Rys. 2. Wartości stwierdzeń

Stopień prawdziwości (6) jest interpretowany (rys. 2b) jako rozszerzenie stałych logicznych NO = 0 i YES = 1 (rys. 2a) do uporządkowanego zbioru  $[0, 1]$  liczb rzeczywistych. Konkretnie zastosowania stopnia prawdziwości (6) różnią się interpretacją wartości stopnia prawdziwości  $T(x) = 0$ , która może oznaczać:

- stwierdzenia, których treści są fałszywe;
- stwierdzenia, dla których brak podstaw do uznania prawdziwości ich treści (co nie oznacza, że istnieją podstawy do uznania treści za fałszywe).

## Dynamiczne systemy doradcze

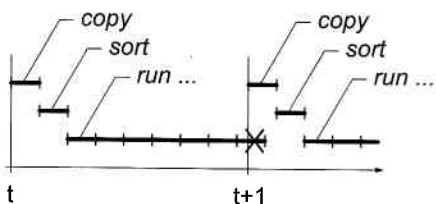
**Dynamiczny system doradczy** jest przeznaczony do realizacji zadań w ograniczonym czasie i przy ograniczonych zasobach. Szczególną klasą systemów dynamicznych są systemy przeznaczone do ciągłej (cyklicznej) analizy (interpretacji) dostarczanych do nich danych.

Konstruując takie systemy na potrzeby diagnostyki technicznej można uwzględnić uproszczenia wynikające z ograniczonej dynamiki zmian stanu technicznego obiektów rzeczywistych. Dla tych obiektów zbiór rozpatrywanych hipotez jest (może być) zbiorem znanym i ograniczonym. Pozwala to na rozpatrywanie procesu wnioskowania jako procesu prowadzonego w „zamkniętym świecie” określonym przez znany zbiór hipotez. Jest on jednak najczęściej zbiorem bardzo licznym, co nie pozwala na stosowanie strategii pełnego przeszukiwania pola możliwych rozwiązań.

Podejmując decyzję o stosowaniu dynamicznego systemu doradczego należy ustalić sposób realizowania przez ten system zadań w ograniczonym czasie i przy ograniczonych zasobach, odpowiadając na następujące pytania dotyczące tego systemu:

- czy ma on działać **bardzo szybko**? (wiadomo, że zawsze wymyślimy takie zadanie, które nie zostanie rozwiązane przez najszybszy system);
- czy ma on gwarantować określony czas wykonywania zadań? (co oznacza, że poszukiwane będzie rozwiązanie najlepsze spośród rozwiązań, jakie można zbadać w ograniczonym czasie);
- czy konieczne jest wykonywanie (przez system) wszystkich zadań cząstkowych?

Stosowane są różne metody takiej organizacji procesu wnioskowania w systemach dynamicznych, które zapewniają racjonalne wyznaczenie konkluzji w zmieniających się warunkach zewnętrznych, pociągających za sobą zmiany przesłanek. Skutecznym sposobem jest zamrażanie oddziaływań zewnętrznych na system (opis otoczenia) na czas trwania podstawowego cyklu wnioskowania (rys. 3 – *copy*). Pozwala to na rozpatrywanie systemu dynamicznego jako systemu quasi-statycznego (statycznego w czasie trwania jednego cyklu) i stosowanie tych metod wnioskowania, które zostały opracowane dla systemów statycznych. Zamrażanie otoczenia pozwala na ograniczanie wielu niedogodności występujących w systemach dynamicznych. Między innymi prowadzi do eliminacji skutków nieznanymi opóźnień, jakie występują pomiędzy zmianą wartości przesłanek oraz zmianą wartości konkluzji będących ich skutkiem.



Rys. 3. Cykl działań dynamicznego systemu doradczego

Szczególnie ciekawą grupę stanowią systemy dynamiczne o gwarantowanym czasie wnioskowania. Systemy takie wyznaczają rozwiązania, które zgodnie ze zgromadzoną w nich wiedzą są rozwiązaniami najlepszymi, jakie można wyznaczyć w zadanym, ograniczonym czasie pozostającym do dyspozycji. Systemy takie mogą być przeznaczone do cyklicznego działania (rys. 3) na podstawie wyników ciągłej obserwacji zmieniającego się (w czasie) obiektu. Ograniczony czas ich działania jest niezbędny dla zagwarantowania możliwości realizacji podstawowego cyklu (w przeznaczonym dla niego czasie).

Dla zapewnienia ograniczonego czasu działania systemu wprowadza się między innymi **algorytmy przyrostowe**, charakteryzujące się tym, że ich działanie może być przerwane po wyczerpaniu odpowiedniego limitu czasu, gdzie limit czasowy nie jest znany w czasie realizacji zadania. Istotą algorytmów przyrostowych jest to, że:

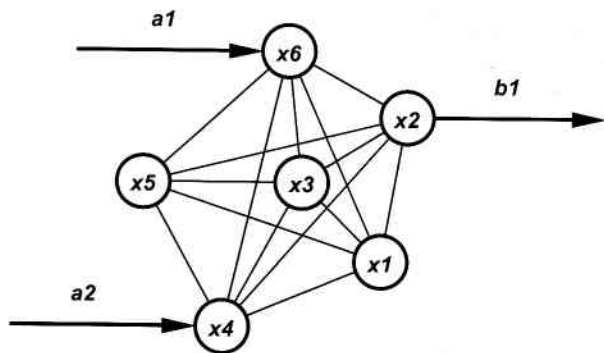
- działania mogą być przerwane w dowolnej chwili;
- zawsze po przerwaniu działań dostępny jest **jakis** wynik;
- jakość wyniku poprawia się monotonicznie z czasem przeznaczonym na wykonywanie działań.

## Tablice ogłoszeń

Porównując różne koncepcje systemów doradczych [9], wspomagających diagnozowanie złożonych układów charakteryzujących się bardzo dużą przestrzenią poszukiwań, niekompletnymi danymi oraz przybliżoną, niepewną i niekompletną wiedzą o rozwiązywanym zadaniu, stwierdzono szczególne zalety systemów bazujących na ogólnej koncepcji **tablicy ogłoszeń**. Tablica ta jest miejscem udostępniania ogłoszeń (zawierających komunikaty o wartości stwierdzeń) ich **odbiorcom**. Koncepcja tablic ogłoszeń została wprowadzona w systemach przeznaczonych do interpretowania mowy [2] i jest stale rozwijana (np. [1, 17, 18, 19]).

Charakterystyczną cechą układów stosujących tablice ogłoszeń jest rozdzielenie wiedzy i realizowanych zadań na niezależne, współdziałające z tablicą moduły. Moduły te (nazywane źródłami wiedzy lub inteligentnymi agentami) są przeznaczone do autonomicznego generowania rozwiązań cząstkowych. Ważnym założeniem jest przyjęcie, że moduły wykonują zadania i sięgają do zasobów w imieniu lub z upoważnienia procesu, do którego są one przyporządkowane. Rozwiązanie takie eliminuje (ogranicza) problemy związane z potrzebą indywidualnego rozwiązywania zagadnień związanych z ochroną dostępu do danych.

Ciekawym spostrzeżeniem jest to, że tablica ogłoszeń może być rozpatrywana jako hierarchicznie uporządkowana baza danych, przeznaczona do przechowywania rozwiązań generowanych przez autonomiczne moduły uprawnione do używania (stosowania) różnych technik wnioskowania w celu efektywnego osiągnięcia najlepszych rozwiązań [6]. Tablica ogłoszeń może być również modelowana jako sieć stwierdzeń oddziaływających na siebie (rys. 4) zgodnie ze znanym zbiorem reguł, czyli jako układ przekształcający stwierdzenia.



Rys. 4. Sieć stwierdzeń dynamicznych:  $a^*$  – oddziaływania otoczenia,  $b^*$  – do obserwatora,  $x^*$  – stwierdzenia dynamiczne

Proces wnioskowania w układzie, w którym występuje tablica ogłoszeń, polega na aktualizacji ogłoszeń umieszczonych na tablicy. Ciekawym sposobem wspomagania procesu wnioskowania jest wyodrębnienie zadania planowania działań realizowanych przez moduły tej tablicy [3]. Postępowanie takie prowadzi do wieloetapowego procesu sterowania tablicą,

w którym będzie występować specjalizowana grupa modułów odpowiedzialnych wyłącznie za wspomaganie wnioskowania o zakresie wykonywanych działań. Należy podkreślić, że postępowanie takie jest (może być) konieczne wtedy, gdy optymalizacja polegająca na pełnym przeglądaniu pola możliwych rozwiązań nie jest możliwa ze względu na rozmiary tego pola.

Powaznym utrudnieniem podczas definiowania strategii procesu wnioskowania jest konieczność uwzględnienia zmienności warunków zewnętrznych. Zmiany te pociągają za sobą zmiany wybranych ogłoszeń umieszczonych na tablicy. Dla tablic realizowanych w postaci relacyjnych lub hierarchicznych baz danych zmiany takie (w połączeniu z nieznanymi opóźnieniami wynikającymi z procesu wnioskowania) mogą powodować utratę spójności wybranych baz.

W celu ograniczenia ubocznych skutków zmian warunków zewnętrznych, w czasie wykonywania zadań przez moduły związane z tablicą ogłoszeń, każde z tych zadań może być traktowane jako transakcja, która będzie zatwierdzana wtedy, gdy są spełnione odpowiednie **warunki końcowe**. Warunki te są badane na podstawie danych opisujących stan otoczenia modułu w chwili badania (nie są w tym celu stosowane dane zapisane w zamrożonej kopii opisu otoczenia). Brak spełnienia tych warunków (spowodowany na przykład znaczącymi zmianami otoczenia w czasie działania modułu) będzie pociągać za sobą wycofanie się systemu z przeprowadzanej transakcji.

Podczas projektowania systemów doradczych, które mają stosować opisaną koncepcję transakcji, należy oszacować oczekiwany stopień zagłębiania transakcji, ponieważ anulowanie złożonych transakcji może pociągać za sobą znaczące zmiany wcześniejszych konkluzji. Pomijając skutki związane z brakiem oczekiwanego wyniku procesu wnioskowania, należy zwrócić uwagę na znaczące ograniczenie prędkości wykonywanych działań, mogące być skutkiem takich nawrotów.

### Działania na stwierdzeniach

Elementy występujące na tablicach ogłoszeń (ogłoszenia) są najczęściej rozpatrywane jako elementy czynne, nazywane czasami agentami. Koncepcja agentów jest bardzo ciekawym modelem teoretycznym [16, 27]. Napotyka ona jednak na znaczące ograniczenia wtedy, gdy są podejmowane próby praktycznych aplikacji.

Główna różnica pomiędzy klasyczną koncepcją tablicy ogłoszeń [2] a modelem tablicy ogłoszeń proponowanym w tym opracowaniu jest związana z różną postacią elementów tablicy. Elementy rozpatrywanej tablicy ogłoszeń będą nazywane **stwierdzeniami aktywnymi**. Zastosowana nazwa (stwierdzenie aktywne) podkreśla to, że zmiany wartości stwierdzeń będą mogły pociągnąć za sobą automatyczne zmiany wartości innych stwierdzeń.

Stwierdzenie aktywne (element modelu tablicy ogłoszeń) reprezentuje jakąś opinię o wybranych atrybutach badanego obiektu. Stwierdzenia takie mogą tworzyć sieć powiązanych i współdziałających węzłów (rys. 4), które ulegają stałym modyfikacjom w związku z dążeniem całej sieci do stanu równowagi. Poza tym każdy węzeł takiej sieci może być zarówno modyfikowany bezpośrednio przez zadania zewnętrzne (np. procesy realizowane przez układy pomiarowe), jak i węzły te są dostępne dla zewnętrznych obserwatorów (np. użytkowników diagnostycznego systemu doradczego). Stwierdzeniom aktywnym są przyporządkowane tzw. demony, czyli szczególna klasa procedur uruchamianych automatycznie w określonych sytuacjach (np. *if\_needed*, *if\_updated*, *if\_inserted*...).

Stwierdzenia aktywne umieszczone na tablicy ogłoszeń mogą należeć do jednej z następujących klas:

- stwierdzenia pierwotne, których wartości nie zależą (jawnie) od wartości innych stwierdzeń i są zadawane bezpośrednio przez procesy zewnętrzne (np. przez układy pomiarowe);

- stwierdzenia wtórne, których wartości zależą (jawnie) od wartości innych stwierdzeń pełniących rolę przesłanek (wartości tych stwierdzeń nie są zadawane bezpośrednio).

Stwierdzenia wtórne mogą być interpretowane jako odpowiedniki konkluzji pośrednich i końcowych, wyznaczanych za pomocą zbioru reguł odpowiadających sieci stwierdzeń. Stwierdzenia te mogą być stwierdzeniami prostymi (zależnymi wyłącznie od jednej przesłanki) lub stwierdzeniami złożonymi (zależnymi od większej liczby przesłanek). Zależność stwierdzenia wtórnego od przesłanek może mieć charakter koniunkcji (operator AND) przesłanek koniecznych, alternatywy (operator OR) przesłanek dostatecznych, agregacji [7] przesłanek niezależnych, zaprzeczenia (operator NOT) lub akumulacji [4] innego stwierdzenia.

Rozpatrywane są wyłącznie działania, w których lewa i prawa strona zależności będzie zawierała stwierdzenia o znanej treści, a wynikiem wykonania działań będzie wyłącznie aktualizacja wartości stwierdzenia występującego po lewej stronie. Działania rozpatrywane są jako szczególny rodzaj relacji występującej pomiędzy lewą i prawą stroną zależności stwierdzenia wtórnego od przesłanek.

Założmy na potrzeby definiowania operatorów, że  $x$ ,  $y$ ,  $z$  oznaczają następujące stwierdzenia

$$x = \langle o(x), a(x), v(x), w(x), t(x), b(x) \rangle \quad (7)$$

$$y = \langle o(y), a(y), v(y), w(y), t(y), b(y) \rangle \quad (8)$$

$$z = \langle o(z), a(z), v(z), w(z), t(z), b(z) \rangle \quad (9)$$

Zaprzeczeniem stwierdzenia  $x$  (7) o wartości  $b(x)$  jest każde takie stwierdzenie  $z$  (9)

$$z = \text{NOT } x \quad (10)$$

którego wartość  $b(z)$  spełnia warunek

$$b(z) = b(\text{NOT } x) = 1 - b(x) \quad (11)$$

Koniunkcją stwierdzeń  $x$  (7) i  $y$  (8) o wartościach  $b(x)$  i  $b(y)$  jest każde takie stwierdzenie  $z$  (9)

$$z = x \text{ AND } y \quad (12)$$

którego wartość  $b(z)$  spełnia warunek

$$b(z) = b(x \text{ AND } y) = \min [b(x), b(y)] \quad (13)$$

Alternatywą stwierdzeń  $x$  (7) i  $y$  (8) o wartościach  $b(x)$  i  $b(y)$  jest każde takie stwierdzenie  $z$  (9)

$$z = x \text{ OR } y \quad (14)$$

którego wartość  $b(z)$  spełnia warunek

$$b(z) = b(x \text{ OR } y) = \max [b(x), b(y)] \quad (15)$$

Zależności (10), (12) i (14) pociągają za sobą warunki (11), (13) i (15), dotyczące wartości stwierdzeń  $z$ . Pozostałe elementy stwierdzenia  $z$  (9) są określane niezależnie od (7) i (8) oraz (10), (12) i (14) przez konstruktora systemu doradczego lub przez osoby aktualizujące bazę wiedzy tego systemu.

### Reguły

Najczęściej stosowaną formą reprezentacji wiedzy w diagnostycznych systemach doradczych są reguły. Dla właściwego sformułowania reguł (wiążących przesłanki z konkluzjami) niezbędne jest właściwe rozróżnianie następujących dwóch klas warunków:

- warunki dostateczne (wystarczające),
- warunki konieczne.

Jeżeli uznaniu prawdziwości stwierdzenia  $x$  towarzyszy zawsze uznanie prawdziwości stwierdzenia  $y$ , lecz niekoniecznie odwrotnie, to  $x$  jest określane jako **warunek dostateczny** dla  $y$  i jednocześnie  $y$  jest określane jako **warunek konieczny** dla  $x$ . Jeżeli  $x$  jest jednocześnie warunkiem koniecznym i dostatecznym dla  $y$ , to także  $y$  będzie warunkiem koniecznym i dostatecznym dla  $x$ .

Wiadomo, że:

- uznanie prawdziwości stwierdzenia  $x$ , będącego warunkiem dostatecznym dla stwierdzenia  $y$ , pociąga za sobą uznanie prawdziwości stwierdzenia  $y$ ;

- uznanie fałszywości stwierdzenia  $x$ , będącego warunkiem dostatecznym dla stwierdzenia  $y$ , nie pociąga za sobą rozstrzygnięć dotyczących uznania lub odrzucenia stwierdzenia  $y$ ;

- uznanie fałszywości stwierdzenia  $y$ , będącego warunkiem koniecznym dla stwierdzenia  $x$ , pociąga za sobą uznanie fałszywości stwierdzenia  $x$ ;

- uznanie prawdziwości stwierdzenia  $y$ , będącego warunkiem koniecznym dla stwierdzenia  $x$ , nie pociąga za sobą rozstrzygnięć dotyczących uznania lub odrzucenia stwierdzenia  $x$ .

Wynika stąd bardzo ważne spostrzeżenie, że dla stwierdzeń  $x$  i  $y$  o wartościach

$$b(x) \in [0, 1] \quad \text{oraz} \quad b(y) \in [0, 1] \quad (16)$$

informację o tym, że  $x$  jest warunkiem dostatecznym dla  $y$  możemy zapisywać

$$b(y) \geq b(x) \quad (17)$$

gdzie uwzględniając (16)

- z uznania prawdziwości stwierdzenia  $x$ , czyli z wartości  $b(x) = 1$  wynika  $b(y) = 1$ , czyli uznanie prawdziwości stwierdzenia  $y$ ;

- z uznania fałszywości stwierdzenia  $x$ , czyli z wartości  $b(x) = 0$  wynika jedynie  $b(y) \geq 0$ , czyli nic nie znaczący wniosek trywialny dla stwierdzenia  $y$ .

Analogicznie informacją o tym, że  $y$  jest warunkiem koniecznym dla  $x$ , możemy zapisywać

$$b(x) \leq b(y) \quad (18)$$

gdzie uwzględniając (16)

- z uznania fałszywości stwierdzenia  $y$ , czyli z wartości  $b(y) = 0$  wynika  $b(x) = 0$ , czyli uznanie fałszywości stwierdzenia  $x$ ;

- z uznania prawdziwości stwierdzenia  $y$ , czyli z wartości  $b(y) = 1$  wynika jedynie  $b(x) \leq 1$ , czyli nic nie znaczący wniosek trywialny dla stwierdzenia  $x$ .

Uznając potrzebę stosowania warunków przybliżonych w tym sensie, że są one warunkami koniecznymi i dostatecznymi z jakąś (niewielką) niedokładnością, można przekształcić warunek (17) do postaci

$$b(y) \geq b(x) - \delta \quad (19)$$

oraz warunek (18) do postaci

$$b(x) \leq b(y) + \delta \quad (20)$$

gdzie  $\delta$  jest wartością stałą

$$\delta \in [0, 1] \quad (21)$$

określającą stopień przybliżenia warunku, przyjmujący dla warunku dokładnego wartość

$$\delta = 0 \quad (22)$$

Koniunkcja stwierdzeń może występować w warunkach koniecznych. Ograniczenia dla wartości stwierdzeń (13), wynikające z występowania między nimi relacji koniunkcji (12), mogą być zapisywane w postaci układu nierówności podobnych do (20)

$$\begin{aligned} b(z) &\leq b(x) + \delta \\ b(z) &\leq b(y) + \delta \end{aligned} \quad (23)$$

Alternatywa stwierdzeń może występować w warunkach dostatecznych. Ograniczenia dla wartości stwierdzeń (15), wynikające z występowania między nimi relacji alternatywy (14), mogą być zapisywane w postaci układu nierówności podobnych do (19)

$$\begin{aligned} b(z) &\geq b(x) - \delta \\ b(z) &\geq b(y) - \delta \end{aligned} \quad (24)$$

### Proces wnioskowania

Znanych jest obecnie wiele różnych sposobów organizacji procesu wnioskowania. Ich wspólną cechą jest to, że jawnie lub ukrycie bazują one na poszukiwaniu odpowiedniej ścieżki lub ścieżek pomiędzy znanymi danymi i weryfikowanymi hipotezami. Różnią się one kierunkami i zwrotami poszukiwanych ścieżek, strategią przeszukiwania pola możliwych rozwiązań oraz kryteriami ograniczania pola rozwiązań, wyboru rozwiązań i kryteriami kończenia procesu przeszukiwań. Postępowanie takie charakteryzuje się tym, że rozwiązanie ogólne jest uzyskiwane na podstawie ciągu rozwiązań zadań lokalnych. Jedną z wad takiego postępowania jest trudność identyfikacji ewentualnych sprzeczności w bazie wiedzy.

W dynamicznych systemach doradczych zaleca się rezygnację z takich sposobów realizacji procesu wnioskowania. Proponuje się postępowanie pozwalające na jednoczesne uwzględnianie wpływu wszystkich czynników, czyli odpowiadające rozumowaniu ogólnemu. Jest ono możliwe poprzez wprowadzenie modelu, w którym wszystkie stwierdzenia tworzą sieć. Gałęzie tej sieci odpowiadają relacjom występującym między stwierdzeniami. Relacje te są znane i zapisywane w bazie wiedzy. Zmiana wartości dowolnego stwierdzenia pociąga za sobą zmiany wartości stwierdzeń sąsiadujących, odpowiednio do relacji występujących między nimi. Część stwierdzeń (stwierdzenia pierwotne) posiada wartości wynikające z zewnętrznych oddziaływań na rozpatrywaną sieć lub dąży do uzyskania takich wartości. Zakłada się, że pozostałe stwierdzenia będą przyjmowały wartości pozwalające na ustalenie stanu równowagi sieci. Brak możliwości uzyskania stanu równowagi będzie sygnałem o lukach lub błędach (sprzecznościach) występujących w bazie wiedzy.

Identyfikacja stanu równowagi sieci może być rozpatrywana jako zagadnienie programowania liniowego. Procedury programowania liniowego (np. [11, 15, 25]) pozwalają na wyznaczenie zawierającej  $N$  elementów nieznannej macierzy kolumnowej  $x$ , której wartość minimalizuje funkcję kryterialną  $z$

$$z = c^T x \quad (25)$$

gdzie  $c$  – kolumnowa macierz stałych współczynników.

Rozwiązanie minimalizujące (25) ma należeć do zbioru rozwiązań dopuszczalnych, spełniających następujące ograniczenia

$$x \geq x_{\min}, \quad x \leq x_{\max} \quad (26)$$

$$Ax \leq b \quad (27)$$

dla

$$b \geq 0 \quad (28)$$

gdzie:

$\underline{A}$  – macierz;

$\underline{b}$ ,  $\underline{x}_{\min}$ ,  $\underline{x}_{\max}$  – kolumnowe macierze stałych współczynników.

Wiedza o rozpatrywanej dziedzinie i uwzględnianych obiektach, zgromadzona w wyniku odpowiedniego procesu jej akwizycji [23], jest zapisywana w bazie wiedzy. Treść tej bazy jest reprezentowana, na potrzeby tablicy ogłoszeń, w postaci odpowiednich równości (11) i nierówności (19), (20), (23), (24) zachodzących między wartościami stwierdzeń. O wyborze nierówności (19), (20), (23), (24) lub ich odpowiedników dokładnych (dla  $\delta = 0$ ) decyduje konstruktor tablicy ogłoszeń i administrator bazy wiedzy. Zakłada się, że dla reguł opisujących np. prawa fizyczne powinna być stosowana reprezentacja dokładna (jeżeli pozwala na to odpowiednia jakość prowadzonych pomiarów). Na podstawie tych równości i nierówności określone są wartości macierzy  $\underline{A}$  i  $\underline{b}$  w (27).

Elementami pośredniczącymi między oddziaływaniami zewnętrznymi (układy pomiarowe, parametry zadawane przez użytkowników) są stwierdzenia pierwotne skojarzone z operatorami akumulującymi. Stwierdzenia te nie są bezpośrednio uwzględniane podczas określania wartości macierzy  $\underline{A}$  i  $\underline{b}$  w (27). Zamiast nich uwzględnia się stwierdzenia pomocnicze równoważne stwierdzeniom pierwotnym.

Wartości rozpatrywanych stwierdzeń wtórnych są elementami niewiadomej macierzy  $\underline{x}$  w (27). Wartości tych elementów są ograniczone zgodnie z (26) przez

$$\underline{x}_{\min} = 0 \quad \text{oraz} \quad \underline{x}_{\max} = 1 \quad (29)$$

Funkcja kryterialna (25) jest wyznaczana z zastosowaniem macierzy  $\underline{c}$ , której elementy przyjmują następujące wartości

$$\begin{aligned} c_j &= -\text{sign}[b(y_j) - 0,5] && \text{dla stwierdzeń pomocniczych} \\ c_j &= 0 && \text{dla pozostałych stwierdzeń} \end{aligned} \quad (30)$$

gdzie  $b(y_j)$  – wartość stwierdzenia pierwotnego, któremu odpowiada  $j$ -te równoważne stwierdzenie pomocnicze.

Rozwiązywanie zadania programowania liniowego rozpoczyna się od przyjęcia wyjściowych wartości nieznanymi stwierdzeń, których wartością domyślną jest 0,5. Należy zauważyć, że stan, w którym wszystkie stwierdzenia przyjmują wartość 0,5, jest jednym z rozwiązań dopuszczalnych. Nie powinno to być jednak rozwiązaniem optymalne wtedy, gdy baza wiedzy została skonstruowana prawidłowo. Rozwiązanie takie oznacza bowiem jedynie to, że „nic nie wiemy”.

Sprowadzenie zadania wnioskowania do problemu definiowanego jako zadanie programowania liniowego pozwala na stosowanie wysoce efektywnych algorytmów numerycznych.

### Zastosowania

Opisana zmodyfikowana koncepcja tablicy ogłoszeń, pozwalająca na realizowanie dynamicznych systemów doradczych, w których proces niemonotonicznego wnioskowania polega na poszukiwaniu równowagi sieci stwierdzeń aktywnych reprezentowanej w postaci układu nierówności, została zastosowana w opracowywanym systemie doradczym wspomagającym proces diagnozowania stanu turbozespołu. Dotychczasowe wyniki badań prototypu tego systemu są pozytywne. Badania te prowadzono między innymi na potrzeby projektu PBZ-038-06, którego podstawowym celem jest opracowanie i uruchomienie systemu DT200, będącego systemem nadzoru diagnostycznego turbozespołu dużej mocy. Projekt PBZ-038-06, finansowany przez Komitet Badań Naukowych w Warszawie, jest realizowany przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Politechnikę Śląską, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Poznańską i Instytut Energetyki w Warszawie.

### LITERATURA

- [1] D. ASH, B. HAYES-ROTH: A Comparison of Action-Based Hierarchies and Decision Trees for Real-Time Performance. Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence. Washington DC 1993.
- [2] Blackboard Systems. R. ENGELMORE, T. MORGAN (eds), Addison-Wesley 1988.
- [3] N. CARVER, V. LESSER: A Planner for the Control of Problem Solving Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Special Issue on Planning, Scheduling and Control, 1993.
- [4] W. CHOLEWA: Transakcje w diagnostycznych systemach doradczych. II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”. Łągow 1997, s. 51–56.
- [5] W. CHOLEWA: Dynamiczne systemy doradcze w diagnostyce technicznej. Kongres Diagnostyki Technicznej, Materiały, Gdańsk 1996, tom I, s. 57–84.
- [6] W. CHOLEWA: Tablice ogłoszeń w diagnostyce technicznej. Materiały Konferencji „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”. Podkowa Leśna 1996, t. 1, s. 42–47.
- [7] W. CHOLEWA: Aggregation of fuzzy opinions – an axiomatic approach. *Fuzzy Sets and Systems* 1985, nr 17, s. 249–258.
- [8] W. CHOLEWA, J. KĄZMIERCZAK: Diagnostyka Techniczna Maszyn – Przetwarzanie cech sygnałów. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1693. Gliwice 1992.
- [9] W. CHOLEWA, W. PEDRYCZ: Systemy doradcze. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1447. Gliwice 1987.
- [10] J. CHROMIEC, E. STRZEMIECZNA: Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1995.
- [11] G. B. DANTZIG: Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, Princeton 1963.
- [12] Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne. W. CHOLEWA, J. KICIŃSKI (red). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [13] D. DUBOIS, H. PRADE: Possibility Theory. An Approach to Computerised Processing of Uncertainty. Plenum Press, New York 1988.
- [14] U. FIEDLER, F. BALDEWEG: Expertensysteme in der technischen Diagnostik. Verlag Technik, Berlin 1990.
- [15] A. GRACE: Optimization Toolbox for Use with Matlab. User's Guide. The MathWorks Inc., Natick 1995.
- [16] A. HADDADI: Communication and Cooperation in Agent Systems. Springer, Berlin 1995.
- [17] B. HAYES-ROTH: An Architecture for Adaptive Intelligent Systems. *Artificial Intelligence* 1995, nr 72, s. 329–365.
- [18] B. HAYES-ROTH: Architectural Foundations for Real-Time Performance in Intelligent Agents. *Journal of Real Time Systems* 1990, nr 2, s. 99–125.
- [19] B. HAYES-ROTH: A Blackboard Architecture for Control. *Artificial Intelligence* 1985, nr 25, s. 251–321.
- [20] R. ISERMANN: Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods – an introduction. *Control Eng. Practice* 1997, nr 5, s. 639–652.
- [21] R. KRUSE, K. D. MEYER: Statistics with Vague Data. Reidel Publ.Comp., Braunschweig 1987.
- [22] MIMOSA Common Relational Information Schema (CRIS). INTERNET <http://www.hsb.com/mimosa>.
- [23] W. MOCZULSKI: Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn. Monografie – Budowa i Eksploatacja Maszyn. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [24] J. J. MULAWKA: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1996.
- [25] W. H. PRESS, S. A. TEUKOLSKY, W. T. VETTERLING, B. P. FLANNERY: Numerical Recipes in C. Cambridge University Press, 1988.
- [26] E. H. SHORLIFFE: Computer-Based Medical Consultation MYCIN. Elsevier, New York 1976.
- [27] M. P. SINGH: Multiagent Systems. Springer, Berlin 1994.
- [28] K. WARWICK, A. EKWUE, R. AGGARWAL: Artificial Intelligence Techniques in Power Systems. The Institution of Electrical Engineers, London 1997.
- [29] L. A. ZADEH: The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems. Elsevier Science Publishers, North-Holland 1983.