

PROCES WNIOSKOWANIA DIAGNOSTYCZNEGO JAKO POSZUKIWANIE RÓWNOWAGI W SIECI STWIERDZEŃ

Wojciech CHOLEWA

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska

44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a

tel.: (032)2371467, fax: (032)2371360, e-mail: wcholewa@polsl.gliwice.pl

Wprowadzenie

Konieczność minimalizacji ryzyka związanego ze stosowaniem złożonych obiektów i procesów technologicznych, wywołała potrzebę racjonalizacji metod rozpoznawania stanu technicznego. Dostępne obecnie układy pomiarowe umożliwiają wyznaczenie wartości różnych cech wielu sygnałów diagnostycznych. Możliwości dalszego przetwarzania tych cech 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 turbozespołu energetycznego) powoduje potrzebę stosowania odpowiednich narzędzi wspomagających proces wnioskowania. Narzędziami takimi są między innymi systemy doradcze [6], nazywane również systemami ekspertowymi [2], [13] lub eksperckimi [7]. Warunkiem stosowania systemu doradczego, jest wcześniejsze pozyskanie wiedzy [12], która stanowić będzie podstawę jego działania.

Diagnostyczne systemy doradcze

Celowość stosowania diagnostycznych systemów doradczych nie jest w chwili obecnej kwestionowana, mimo iż przykładów ich poważnych zastosowań jest niewiele. Wydaje się, iż przyczyną braku takich zastosowań nie są wady systemów doradczych, do których zalicza się na przykład to [9], że większość z nich stosuje reprezentację wiedzy w postaci reguł, które nie pozwalają na pełne zapisanie wiedzy stosowanej przez człowieka w realizowanych przez niego procesach rozumowania. Przyczynami ograniczonych zastosowań systemów doradczych w układach monitorujących i diagnozujących są prawdopodobnie (zdaniem autora) znaczące trudności występujące podczas konstruowania takich systemów dla zastosowań w tzw. czasie rzeczywistym, charakteryzujących się tym, że

- kontekst, w ramach którego prowadzony jest proces wnioskowania, nie jest stały co powoduje, że przesłanki reguł są funkcjami czasu,
- proces wnioskowania nie powinien być procesem monotonicznym, w którym zwiększanie zbioru uznanych przesłanek nie może prowadzić do zmian wcześniej wyznaczonych konkluzji.

Porównując różne koncepcje systemów doradczych, przystosowanych do rozwiązywania zadań charakteryzujących się dużą przestrzenią poszukiwań, niekompletnymi danymi oraz przybliżoną, niepewną i niekompletną wiedzą o rozwiązywanym zadaniu, stwierdzono szczególne zalety systemów bazujących na ogólnej koncepcji tablicy ogłoszeń. Koncepcja tablic ogłoszeń została wprowadzona w systemach przeznaczonych do interpretowania mowy i jest stale rozwijana (np. [10], [1], [11]).

Korzystając z tej koncepcji zaproponowano [3] rozpatrywanie diagnostycznych systemów doradczych jako systemów dynamicznych, których głównymi elementami są tablice zawierające ogłoszenia. Moduły programowe współdziałające z tablicą mogą (w zakresie przyznanych im indywidualnych uprawnień) odczytywać ogłoszenia występujące na tablicy, wprowadzać nowe ogłoszenia, zmieniać ich treść oraz usuwać ogłoszenia nieaktualne. Można określać wiele modeli takich systemów, różniących się między sobą przyjmowanymi definicjami ogłoszeń, formatami ich zapisywania, sposobami specyfikowania i stosowania reguł, reprezentujących określoną wiedzę oraz sposobami zarządzania tablicą.

Tablice ogłoszeń

Rezygnując z formalizmów można stwierdzić, że tablica ogłoszeń jest miejscem udostępniania ogłoszeń.

Charakterystyczną cechą układów stosujących tablice ogłoszeń jest rozdzielenie danych, informacji, wiedzy i realizowanych zadań na niezależne, współdziałające z tablicą moduły. Moduły te (nazywane ogólnie źródłami wiedzy lub inteligentnymi agentami) przeznaczone są do autonomicznego generowania rozwiązań cząstkowych. Ważnym założeniem jest przyjęcie, iż 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 złożonych zagadnień związanych z ochroną dostępu do danych.

Główna różnica pomiędzy klasyczną koncepcją tablicy ogłoszeń [1] i proponowanym modelem tablicy ogłoszeń [4] jest związana z różną postacią elementów tablicy, nazywanych (tutaj) ogłosze-

niami. Dla potrzeb zarządzania tablicą, występujące na niej ogłoszenia dzieli się na co najmniej dwa rozłączne zbiory, zawierające ogłoszenia pierwotne i ogłoszenia wtórne. Proces wnioskowania w układzie, w którym występuje tablica ogłoszeń, polega na aktualizacji ogłoszeń wtórnych umieszczonych na tablicy. Aktualizacja taka jest realizowana autonomicznie w obrębie tablicy.

Współdziałanie tablicy ogłoszeń z układami wejściowymi (obejmującymi między innymi układy pomiarowe, układy dostępu do baz danych itp.) polega na aktualizacji wybranych ogłoszeń pierwotnych wyłącznie na podstawie danych pobieranych z otoczenia tablicy. Poważnym utrudnieniem podczas definiowania strategii procesu wnioskowania jest konieczność uwzględnienia zmienności warunków zewnętrznych, które pociągają (mogą pociągać) za sobą zmiany wybranych ogłoszeń pierwotnych umieszczonych na tablicy. Zakłada się, że ogłoszenia pierwotne nie mogą być modyfikowane w wyniku realizacji procesu wnioskowania. Oznacza to na przykład, że realizacja procedur uzgadniania, wyrównywania lub walidacji danych pomiarowych, nie będzie polegała na modyfikowaniu ogłoszeń pierwotnych dotyczących danych pomiarowych. Będzie ona wymagać wprowadzenia odpowiednich pomocniczych ogłoszeń wtórnych dotyczących danych uzgodnionych.

Ciekawe i skuteczne aplikacje można uzyskać poprzez definiowanie tablic ogłoszeń w środowisku odpowiednio wybranego systemu relacyjnych baz danych [5]. Dla ograniczenia ubocznych skutków zmian warunków zewnętrznych, w czasie wykonywania zadań przez moduły związane z tablicą ogłoszeń, każde z tych zadań traktowane może być jako transakcja, która będzie zatwierdzana wtedy, gdy zostaną spełnione odpowiednie warunki końcowe. Warunki te badane są 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) pociągać będzie za sobą wycofanie się systemu z przeprowadzanej transakcji.

Stwierdzenia

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

$$s = \langle c(s), b(s) \rangle, \quad (1)$$

gdzie $c(s)$ jest treścią stwierdzenia s , a $b(s)$ jest wartością stwierdzenia, czyli oceną stopnia prawdziwości lub stopnia przekonania o prawdziwości stwierdzenia s .

Zapis (1) może być uzupełniany dodatkowymi elementami, określającymi na przykład wagę (stopień ważności) stwierdzenia; stanowiącą podstawę porządkowania komunikatów wysyłanych do użytkownika systemu doradczego.

Treść $c(s)$ stwierdzenia s może być zapisywana w postaci opisującego ją łańcucha tekstowego

$$c(s) = \text{'tekst'} \quad (2)$$

lub w postaci trójki uporządkowanej

$$c(s) = \langle o, a, v \rangle \quad (3)$$

oznaczającej wypowiedź, że obiektowi o przysługuje atrybut a o wartości v . Dla ograniczenia nadmiarowości danych i ograniczenia ilości pamięci niezbędnej do rejestrowania zmieniających się stwierdzeń stosowane są słowniki treści stwierdzeń. Proponowana postać zapisu treści (3) pozwala na hierarchiczne porządkowanie elementów takich słowników.

Ogłoszenia umieszczane na tablicy ogłoszeń informują o treści i wartości stwierdzeń (1), lub wyłącznie o wartości stwierdzeń (wtedy gdy stosowane są słowniki treści stwierdzeń).

Wartość $b(s)$ stwierdzenia s jest miarą akceptacji wypowiedzi (2) lub (3). Najprostszym sposobem definiowania wartości $b(s)$ jest stosowanie stałych logicznych YES, NO (tak, nie). Prowadzi to bezpośrednio do klasycznego rachunku zdań. W rozbudowanych systemach wprowadza się wartość specjalną, dla oznaczania nieznannej akceptacji treści stwierdzenia. Dodatkowa wartość specjalna jest stosowana dla oznaczania wartości stwierdzeń nie mających sensu lub takich, które nie mogą być ani prawdziwe ani fałszywe. Z tej dodatkowej wartości można zrezygnować wtedy, gdy stosowane są słowniki treści stwierdzeń, pozwalające na ich wstępną selekcję.

Diagnostyczne systemy doradcze wymagają stosowania stwierdzeń przybliżonych oraz niepewnych. Prosty podejściem formalnym, pozwalającym na rozpatrywanie takich stwierdzeń, jest zastosowanie rachunku prawdopodobieństwa oraz przyjęcia umowy, iż wartością $b(s)$ stwierdzenia s będzie prawdopodobieństwo (subiektywne) prawdziwości treści $c(s)$. Uogólnieniem tego podejścia jest przyjęcie założenia, że wartością stwierdzenia s jest jego stopień prawdziwości, interpretowany jako rozszerzenie stałych logicznych NO=0 i YES=1 do uporządkowanego zbioru $[0, 1]$ liczb rzeczywistych.

Stwierdzenia dynamiczne

Szczególną klasę systemów doradczych stanowią dynamiczne systemy doradcze przeznaczone do realizacji zadań w ograniczonym czasie i przy ograniczonych zasobach. Systemami takimi są na przykład systemy przeznaczone do ciągłej (cyklicznej) analizy (interpretacji) dostarczanych do nich danych.

Przydatną koncepcją podczas tworzenia takich systemów są tablice ogłoszeń zawierające stwierdzenia dynamiczne, czyli stwierdzenia zależne od czasu. Należy zaznaczyć, że w diagnostycznych systemach doradczych, w których wprowadzono słowniki treści stwierdzeń, stwierdzenie dynamiczne $s(t)$ może być rozpatrywane jako para (1) złożona ze stałej, niezależnej od czasu treści $c(s)$ oraz zmiennej, zależnej od czasu wartości $b(s(t))$ czyli $b(s, t)$

$$s(t) = \langle c(s), b(s, t) \rangle \quad (4)$$

Realizacja procesu wnioskowania w systemach dynamicznych, ma zapewnić racjonalne wyznaczenie konkluzji w zmieniających się warunkach zewnętrznych, które mogą pociągać za sobą zmiany przesłanek. Skutecznym sposobem realizacji takiego procesu jest zamrażanie oddziaływań zewnętrznych na system na czas trwania podstawowego cyklu wnioskowania. Pozwala to na rozpatrywanie systemu dynamicznego jako systemu quasi-statycznego (statycznego w czasie trwania jednego cyklu) i stosowanie tych metod wnioskowania, które opracowane zostały dla systemów statycznych. Zamrażanie otoczenia pozwala na ograniczanie wielu niedogodności występujących w systemach dynamicznych. Między innymi prowadzi do eliminacji skutków nieznanych opóźnień, jakie występują pomiędzy zmianą wartości przesłanek oraz zmianą wartości konkluzji, będących ich skutkiem.

Relacje między stwierdzeniami

Przeglądając publikacje dotyczące diagnostycznych systemów doradczych można zauważyć, że najczęściej stosowaną formą reprezentacji wiedzy w tych systemach są reguły. Reguły otrzymywane są w wyniku odpowiedniego procesu pozyskiwania wiedzy [12].

Z wykonanych badań (np. [8]) wynika, że podczas formułowania reguł (wiążących przesłanki z konkluzjami) należy właściwie rozróżniać warunki dostateczne (wystarczające) i warunków koniecznych.

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

Wynika stąd ciekawe i bardzo ważne spostrzeżenie, iż dla stwierdzeń x i y o wartościach rozpatrywanych w postaci stopni prawdziwości $b(x) \in [0,1]$ oraz $b(y) \in [0,1]$ informację (regułę r) o tym, że x jest warunkiem dostatecznym dla y można zapisywać

$$r: b(y) \geq b(x). \quad (5)$$

Analogicznie, informację (regułę r) o tym, że y jest warunkiem koniecznym dla x , można zapisywać

$$r: b(x) \leq b(y). \quad (6)$$

Stosowanie warunków (5) i (6) wymaga założenia iż dostępna jest dokładna wiedza dotycząca rozpatrywanego obiektu oraz założenia, że w zbiorze reguł reprezentujących tę wiedzę nie występują sprzeczności. Często założenia takie należy uznać jako zbyt silne. Uznając potrzebę stosowania reguł przybliżonych w tym sensie, że są one reprezentowane przez warunki konieczne lub dostateczne z jakąś (niewielką) niedokładnością, można uogólnić warunki (5) oraz (6) odpowiednio do postaci

$$r: b(y) \geq b(x) - \delta \quad (7)$$

$$r: b(x) \leq b(y) + \delta. \quad (8)$$

gdzie $\delta \in [0,1]$ jest wartością stałą określającą stopień przybliżenia warunku. Wartość δ przyjmowana jest wspólnie dla wszystkich reguł lub indywidualnie dla każdej reguły, jako $\delta(r)$.

Proces wnioskowania

Znanych jest obecnie wiele różnych sposobów organizacji procesu wnioskowania. Wspólną cechą większości z nich jest to, że jawnie lub domyślnie 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, kryteriami wyboru rozwiązań i kryteriami kończenia procesu przeszukiwania. Postępowanie polegające na poszukiwaniu wymienionych ścieżek charakteryzuje się tym, że rozwiązanie ogólne uzyskiwane jest 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. Jego realizacja jest możliwa poprzez wprowadzenie modelu, w którym wszystkie stwierdzenia tworzą sieć. Gałęzie tej sieci odpowiadają relacjom występującym między stwierdzeniami. 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.

Stan równowagi w sieci stwierdzeń

Identyfikacja stanu równowagi omawianej sieci może być rozpatrywana jako klasyczne zagadnienie programowania liniowego. Brak możliwości uzyskania stanu równowagi dla $\delta=0$, będzie sygnałem o lukach lub błędach (sprzecznościach) występujących w bazie wiedzy. Można zauważyć, że dla $\delta=1$, spełnione będą wszelkie warunki (7) i (8). Minimalizacja wartości δ , dla której spełnione są te warunki może stanowić kryterium optymalizacji poszukiwanego rozwiązania.

Sprobadzenie zadania wnioskowania do problemu definiowanego jako zadanie programowania liniowego pozwala na stosowanie wysoce efektywnych algorytmów numerycznych. Iteracyjne rozwiązywanie takiego zadania rozpoczyna się od przyjęcia wyjściowych wartości nieznanymi stwierdzeń, których wartością domyślną może być 0,5. Należy zauważyć, że stan w którym wszystkie stwierdzenia przyjmują wartość 0,5 zapewnia spełnienie wszelkich zbiorów warunków (7) i (8). Jest to jedno z rozwiązań dopuszczalnych, oznaczające jednak jedynie to, że „nic nie wiemy”.

Rozpatrując zbiory reguł, zarówno dokładnych (5), (6) jak i przybliżonych (7), (8) można zauważyć, że wymienione warunki mogą nie wskazywać jednoznacznego rozwiązania. Wynika to z postaci reguł zapisywanych jako nierówności. Dla uzyskania rozwiązań jednoznacznych potrzebne są dodatkowe kryteria wyboru rozwiązań optymalnych. Ich przykładem może być wymaganie minimalizacji wartości stopnia nieokreśloności rozwiązania reprezentowanego przez zbiór S stwierdzeń wtórnych, gdzie miarą takiego stopnia nieokreśloności jest entropia wartości stwierdzeń wtórnych

$$H(S) = -\sum_{s \in S} b(s) \log_2 b(s) \quad (9)$$

Kryterium (9) prowadzi do rozwiązań zgodnych z intuicyjnymi oczekiwaniami. Jego wadą jest wysoki stopień złożoności algorytmów stosowanych do wyznaczania rozwiązań.

Podsumowanie

Opisano istotę działania dynamicznego systemu doradczego bazującego na koncepcji tablicy ogłoszeń. Elementy tej tablicy tworzą sieć stwierdzeń, których wartości mają spełniać warunki wynikające z przyjętych schematów wnioskowania. Wartości logiczne stwierdzeń, określanych jako stwierdzenia pierwotne, ustalane są na podstawie wyników cyklicznie prowadzonych pomiarów. Na podstawie tych stwierdzeń wyznaczane są (w warunkach równowagi chwilowej) wartości stwierdzeń wtórnych, których część pokazywana jest użytkownikowi. Proces wnioskowania prowadzony za pomocą takiej tablicy może być interpretowany jako poszukiwanie warunków równowagi w sieci oddziaływujących na

siebie stwierdzeń. Możliwość zmieniania, na podstawie wyników wykonywanych pomiarów, wartości występujących w sieci stwierdzeń pierwotnych pozwala na typowy dla diagnostyki technicznej, niemonotoniczny charakter realizowanego procesu wnioskowania.

Opisany system doradczy nadaje się do stosowania w systemach diagnozowania i monitorowania stanu maszyn [8]. Jego szczególną cechą jest możliwość łączenia za pośrednictwem tablicy ogłoszeń wielu rozproszonych modułów jako źródeł danych, działających w różnych środowiskach, bez konieczności stawiania wymogu ich synchronicznego współdziałania.

Literatura

- [1] *Blackboard Systems*. Englemore R., Morgan T. (eds), Addison-Wesley 1988.
- [2] Bubnicki Z.: *Wstęp do systemów ekspertowych*. PWN, Warszawa 1990
- [3] Cholewa W.: *Struktury baz danych i bazy wiedzy w systemie szkieletowym MAS*. Materiały konferencji Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe. Wrocław 1993, s.443-449.
- [4] Cholewa W.: *Tablice ogłoszeń w diagnostycznych systemach doradczych*. Pomiary, Automatyka, Kontrola 4/98, s.123-128.
- [5] Cholewa W.: *Proces wnioskowania w systemie diagnostycznym DT200*. Materiały konferencji Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Jurata 1998, s.157-162.
- [6] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1447. Gliwice 1987.
- [7] Chromiec J., Strzemieczna E.: *Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1995.
- [8] DT200-1. *System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW*. Cholewa W., Kiciński J. (red), Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 1998.
- [9] Flanagan M.A.: *Innovative tools for automatic vibration analysis and diagnosis*. Machine, Plant & Systems Monitor, February 1998, p. 17-20.
- [10] Hayes-Roth B.: *A Blackboard Architecture for Control*. Artificial Intelligence 25 (1985), 251-321.
- [11] Hayes-Roth B.: *An Architecture for Adaptive Intelligent Systems*. Artificial Intelligence, 72 (1995) 329-365.
- [12] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [13] Mulawka J. J.: *Systemy ekspertowe*. WNT, Warszawa 1996.