

## SIECI STWIERDZEŃ W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ

Wojciech CHOLEWA

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, e-mail: [wch@polsl.pl](mailto:wch@polsl.pl)

### Streszczenie

Opisano zwięźle główne klasy systemów bazujących na wiedzy, które mogą być stosowane do wnioskowania w diagnostyce technicznej. Ich szczególne znaczenie jest związane z możliwościami oferowanymi przez systemy stosujące sieci stwierdzeń. Omówiono wybrane zagadnienia związane ze stosowaniem bardzo obiecujących sieci stwierdzeń dynamicznych. Wydaje się, że będą one mogły skutecznie wspomagać między innymi rozwiązywanie zadań diagnostycznych dla obiektów działających w warunkach przejściowych.

Słowa kluczowe: systemy doradcze, sieci stwierdzeń, stwierdzenia dynamiczne.

### STATEMENT NETWORKS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS

#### Summary

Paper discusses shortly main classes of knowledge based systems applied for reasoning in technical diagnostics. Their considerable importance is connected with possibilities delivered by systems basing on statement networks. Selected details related to the application of very promising dynamic statement networks are also discussed. It seems that they can effectively aid solving diagnostic tasks for objects running in transient conditions.

Keywords: expert systems, statement networks, dynamic statements.

## 1. WPROWADZENIE

W celu zapewnienia racjonalnej eksploatacji obiektów technicznych stosowane są między innymi różne rodzaje systemów diagnozujących i monitorujących. Systemy diagnozujące umożliwiają rozpoznawanie stanu lub zmian stanu technicznego rozpatrywanego obiektu na podstawie zgromadzonych wyników obserwacji jego działania. Systemy monitorujące umożliwiają ciągłą obserwację działania obiektu, której wyniki stanowią podstawę do rozpoznawania zachodzących zmian klas stanu technicznego.

Procesy wnioskowania o stanach technicznych obiektów i ich zmianach mogą być wspomagane różnymi sformalizowanymi systemami podejmowania decyzji. Szczególne znaczenie mają systemy nazywane systemami bazującymi na wiedzy. Systemy te dysponując zapisaną wiedzą specjalistów z wybranej dziedziny, mogą ją stosować wielokrotnie, umożliwiając rozwiązywanie zadań bez bezpośredniego udziału specjalisty. W procesie budowania i stosowania takich systemów można wskazać trzy znacznie różniące się role, w jakich występują korzystające z nich osoby lub inne systemy:

- główną rolą jest *użytkownik końcowy*, który stosuje system jako narzędzie wspomagające prowadzony przez tego użytkownika proces

podejmowania decyzji o stanie rozpatrywanego obiektu;

- pozostałe dwie role to *specjalista dziedziny zastosowań* odpowiedzialny za wiedzę zgromadzoną w systemie oraz *inżynier wiedzy* odpowiedzialny za wybór istoty działania systemu i sposobu reprezentacji wiedzy odpowiednio dla uwzględnianej wiedzy.

Rozwojowi tych systemów sprzyja wyraźne rozdzielenie ról specjalisty dziedziny zastosowań i inżyniera wiedzy.

Celem opracowania jest przedstawienie zwięzłego przeglądu wybranych systemów wspomagających wnioskowanie oraz omówienie istoty działania nowych systemów budowanych jako sieci stwierdzeń, a w szczególności sieci stwierdzeń dynamicznych. Sieci te są aktualnie przedmiotem badań. Przewiduje się możliwość ich skutecznego zastosowania w systemach diagnozujących i monitorujących.

## 2. SYSTEMY DORADCZE

Szczególne miejsce wśród systemów wspomagających podejmowanie decyzji zajmują systemy doradcze, nazywane również systemami ekspertowymi. System doradczy powinien posiadać zdolność do rozpoczęcia i kontynuowania procesu wnioskowania oraz zdolność do wykonywania

działań związanych z tym procesem, wtedy gdy zezwala na to lub wymaga tego użytkownik systemu. Charakterystyczną cechą tych systemów jest możliwość budowania oprogramowania niezależnego od dziedziny zastosowań i występującego w postaci tzw. systemów szkieletowych, zawierających moduły umożliwiające działanie systemu, komunikację ze źródłami danych i dialog z użytkownikiem, w tym objaśnianie wyników działania. W celu uzyskania kompletnego systemu doradczego system szkieletowy uzupełniany jest o bazę wiedzy zawierającą odpowiednio zapisany fragment wiedzy rozpatrywanej dziedziny.

Jednym z najważniejszych elementów systemów doradczych jest układ objaśniający przeznaczony do udostępniania użytkownikowi systemu wszelkich objaśnień, które pozwolą mu na uznanie iż wnioski proponowane przez system są poprawne. Konieczność stosowania objaśnień wynika między innymi stąd, że system doradczy powinien dysponować bazą wiedzy, której zakres znacznie wykracza poza wiedzę posiadaną przez użytkownika co powoduje, że bezpośrednia weryfikacja przez użytkownika wyników działania systemu może być utrudniona lub niemożliwa.

Wiedza zapisana w systemie doradczym może obejmować zarówno wiedzę deklaratywną zawierającą orzeczenia o uznanych faktach, jak i wiedzę proceduralną dotyczącą działania obiektów i ogólnych sposobów postępowania. Wiedza ta może być pozyskiwana [19], [20] z różnych źródeł. Szczególnie ważnymi źródłami wiedzy diagnostycznej są specjaliści tej dziedziny i ich publikacje oraz eksploatacyjne bazy danych i wyniki badań symulacyjnych. Niestety dostępne obecnie metody pozyskiwania wiedzy nie zapewniają jeszcze odpowiedniej efektywności bezpośredniego pozyskiwania wiedzy od specjalistów.

Rozpatrywane mogą być dwie kategorie systemów doradczych [5]:

- systemy statyczne działające w stałym otoczeniu,
- systemy dynamiczne działające w zmieniającym się otoczeniu i przystosowane do realizowania zadań w ograniczonym czasie.

Charakterystyczną cechą systemów doradczych jest to, że sekwencja działań pozwalających na wyznaczenie wniosków nie jest ustalana (programowana) w czasie konstruowania systemu. Kolejne działania są ustalane dynamicznie przez układ wnioskujący systemu, z uwzględnieniem jego aktualnego stanu.

Podstawową klasą systemów doradczych są systemy prowadzące wnioskowanie zgodnie z zasadami logiki klasycznej. W systemach tych baza wiedzy składa się z reguł zapisywanych w postaci:

*jeżeli przesłanka to konkluzja* (1)

gdzie *przesłanka* jest wyrażeniem logicznym. Reguły takie mogą tworzyć łańcuchy, w których konkluzja wybranej reguły jest jednocześnie przesłanką reguły następującej po niej. Przyjęcie, iż przesłanka pierwszej reguły w łańcuchu może być uznana jako prawdziwa, pozwala na przyjęcie, że konkluzja, czyli równocześnie przesłanka następnej reguły, jest prawdziwa. Pozwala to następnie na tzw. wnioskowanie w przód tzn. na uznawanie, że konkluzje kolejnych reguł są prawdziwe. Podobnie przyjęcie, że konkluzja ostatniej reguły w łańcuchu nie może być uznana jako prawdziwa (tzn. jest fałszywa) pozwala na tzw. wnioskowanie wstecz, czyli na uznawanie, że przesłanki poprzedzających reguł nie są prawdziwe. Zbiory reguł mogą tworzyć struktury inne niż łańcuchy, zwłaszcza wtedy gdy występują w nich przesłanki złożone. Wnioskowanie w takich zbiorach reguł jest prowadzone przez moduły wnioskujące zawarte w systemach szkieletowych.

Literatura omawiająca zagadnienia związane z konstruowaniem i stosowaniem systemów doradczych jest bardzo obszerna. W języku polskim wydano między innymi następujące przeglądowe prace zwarte [1], [5], [6], [7], [8], [14], [18], [21], [23], [25].

### 3. ZMIENNE OTOCZENIE

Systemy doradcze są przeznaczone do działania w określonym otoczeniu. Większość stosowanych obecnie systemów to systemy statyczne, a dokładniej systemy przeznaczone do działania w statycznym otoczeniu. Użyte określenie "otoczenie statyczne" nie oznacza, że otoczenie systemu jest niezmiennie. Wskazuje ono jedynie, że dla potrzeb działającego w nim systemu uwzględniany jest stan tego otoczenia, aktualny w chwili obserwacji. Równocześnie wiadomo, że zarówno diagnostyka maszyn jak i diagnostyka procesów wymagają uwzględniania informacji o charakterze zmian obserwowanych wielkości fizycznych, związanych z działaniem obserwowanej maszyny lub przebiegiem obserwowanego procesu.

W celu opisanie dynamiki zmian otoczenia stosowanych jest szereg, wprowadzanych ad hoc, rozwiązań. Jednym z najczęściej stosowanych sposobów jest uzupełnianie zbiorów cech uwzględnianych sygnałów o pochodne pierwszego i wyższych rzędów, tych sygnałów. Wartości pochodnych są nośnikami informacji o zachodzących zmianach. Wprowadzenie takich dodatkowych cech sygnałów pozwala na opisywanie otoczenia dynamicznego z zastosowaniem metod przeznaczonych głównie do opisywania otoczenia statycznego. Brak jest jednak uniwersalnych metod postępowania umożliwiających reprezentowanie otoczenia zmieniającego się w czasie. Ciekawy

przegląd związanych z tym zagadnień zamieszczono w [10].

Omawiając systemy, w których wiedza reprezentowana jest za pomocą reguł, należy zwrócić uwagę na to, że systemy te umożliwiają realizowanie wnioskowania monotonicznego. Charakteryzuje się ono tym, że uznanie nowych przesłanek, których wartości logiczne nie były wcześniej znane, nie może prowadzić do zmiany wartości logicznych uznanych dotychczas konkluzji, tzn. nie może wpływać na zmianę uzyskanych już wyników procesu wnioskowania. Własność ta jest szczególnie niedogodna w systemach diagnostycznych, ponieważ wynikiem działania takich systemów mają być wnioski o stanie rozpatrywanego obiektu, który może ulegać zmianie.

W celu uniknięcia ograniczeń wynikających ze stosowania wnioskowania monotonicznego można prowadzić wnioskowanie częściowo niemonotoniczne, zapewniające racjonalne wyznaczanie konkluzji w zmieniających się warunkach zewnętrznych i realizowane jako szereg niezależnych procesów wnioskowania monotonicznego. Procesy te uruchamiane są dla obiektu rozpatrywanego jako obiekt "zamrażany" w kolejnych dyskretnych chwilach czasu. Wynikiem tych procesów są szeregi niezależnie wyznaczonych konkluzji. W każdym z takich szeregów wartości logiczne uznanych konkluzji mogą się zmieniać.

#### 4. PRZYBLIŻONE SYSTEMY DORADCZE

Założenie, iż w bazie wiedzy systemu doradczego występują wyłącznie reguły dokładnie zapisywane w postaci (1), jest często nadmiernym ograniczeniem. Źródłem wiedzy mogą być bowiem nie tylko dokładnie znane prawa i fakty. Wiedza rozpatrywanej dziedziny może być udostępniana również w postaci niedokładnych opinii specjalistów, niepewnych wyników obserwacji obiektu lub przybliżonych modeli. Zastosowanie takiej wiedzy wymaga użycia przybliżonych metod wnioskowania [4], które charakteryzują się stosowaniem przybliżonych/niepewnych reguł, przesłanek i konkluzji. Nie opracowano ogólnej metody reprezentowania takich elementów przybliżonych.

Stosowane są dwie klasy przybliżonych metod wnioskowania:

- pierwsza klasa, która nie będzie rozpatrywana w dalszej części opracowania, związana jest ze stosowaniem koncepcji zbiorów i relacji rozmytych [16] [22] [26];
- druga klasa metod polega na stosowaniu różnych kategorii stopni pewności lub stopni prawdziwości elementów występujących w postaci przesłanek, konkluzji oraz reguł.

Bardzo ważnym i trudnym zadaniem jest ustalenie właściwej interpretacji stosowanych miar

(stopni pewności). Miary te mogą być interpretowane jako prawdopodobieństwa zdarzeń polegających na tym, że odpowiedni element jest prawdziwy lub jako stopnie prawdziwości tych elementów. Wprowadzenie prawdopodobieństw pozwala na stosowanie statystycznych metod weryfikacji hipotez. Wymaga to jednak przyjęcia licznych założeń, dla których możliwości weryfikacji ich słuszności są często bardzo ograniczone. Jest to przyczyną rezygnowania ze stosowania prawdopodobieństw definiowanych na podstawie częstości zdarzeń i zastępowania ich prawdopodobieństwami o wartościach ustalanych subiektywnie. Przyjmowane zasady wykonywania działań na stopniach pewności mogą być przyczyną wielu intuicyjnych wątpliwości. Główną wątpliwość związana jest z częstym utożsamianiem wartości logicznej stwierdzenia (prawda, fałsz) z jego stopniem pewności. Liczne wątpliwości związane są również z przyjmowanymi modelami propagacji niepewności i niedokładności w układzie wnioskującym.

#### 5. SIECI PRZEKONAŃ

Przybliżone systemy doradcze umożliwiają stosowanie przybliżonych i/lub niepewnych reguł, przesłanek oraz konkluzji. Stopnie prawdziwości reguł i przesłanek wyznaczane są najczęściej na podstawie subiektywnych opinii specjalistów rozpatrywanej dziedziny i konstruktorów systemu. Wynikiem badań weryfikacyjnych mogą być zalecenia dotyczące niezbędnych modyfikacji tak ustalonych wartości stopni. Proces modyfikowania tych wartości nazywany jest procesem strojenia systemu. Wadą systemów doradczych bazujących na zbiorach reguł są trudności praktycznej realizacji takiego strojenia, zwłaszcza wtedy gdy uwzględniany jest liczny zbiór reguł. Trudności te występują w mniejszym stopniu w systemach, w których bazy wiedzy reprezentowane są w postaci grafów.

Stosowanie grafów jako modelu pozwalającego na reprezentowanie wiedzy ma długą historię, np. [27]. Do ważniejszych koncepcji szczegółowych należy zaliczyć sieci Markova [13] [17], rozpatrywane często w postaci tzw. tablic kontyngencji oraz sieci bayesowskie [24] [2] [12], nazywane również sieciami przekonań. Sieci przekonań spotykają się z coraz większym uznaniem, jako skuteczne narzędzia, przydatne do wnioskowania przybliżonego.

Sieć Markova jest grafem nieskierowanym, w którym każdej gałęzi przypisane jest symetryczne prawdopodobieństwo współwystępowania węzłów łączonych przez tą gałąź. Sieć ta nie pozwala na bezpośrednie reprezentowanie wiedzy dotyczącej zależności przyczynowo-skutkowych nawet wtedy, gdy występują one pomiędzy węzłami.

Sieć przekonanych jest acyklicznym (nie zawierającym cykli) grafem skierowanym, składającym się z węzłów i łączących je gałęzi skierowanych. Węzłom przypisywane są kompletne (wyczerpujące) zestawy ich wykluczających się stanów oraz wektory wartości węzłów, określające rozkłady ich stanów i zawierające odpowiednie wartości prawdopodobieństw interpretowanych jako stopnie przekonania o tym, że węzeł znajduje się w określonym stanie. Węzłom przyporządkowane są również tablice zawierające wartości prawdopodobieństw warunkowych dla wszystkich elementów iloczynu kartezjańskiego zestawów stanów węzłów nadrzędnych i węzła posiadającego tablicę. Tablice prawdopodobieństw warunkowych opisują relacje występujące między węzłami. Nie zakłada się że są to relacje przyczynowo skutkowe.

Wnioskowanie z zastosowaniem sieci przekonanych, posiadającej kompletne tablice prawdopodobieństw warunkowych, polega na uzgadnianiu prawdopodobieństw przypisanych kolejnym węzłom, w celu wyznaczenia stanu równowagi sieci, w którym spełnione jest twierdzenie Bayesa o prawdopodobieństwach warunkowych. Próby poszukiwania rozwiązań globalnych mogą prowadzić do zadań NP-trudnych. Skutecznym sposobem postępowania jest identyfikowanie węzłów warunkowo niezależnych, a następnie poszukiwanie rozwiązań lokalnych obejmujących kolejne węzły, ich rodziców i dzieci. Ciekawymi pracami omawiającymi sposoby formułowania i rozwiązywania takich zadań są [24], [15].

## 6. TABLICE OGŁOSZEŃ

W rozwoju sztucznej inteligencji wyjątkową rolę spełniły systemy bazujące na koncepcji tablicy ogłoszeń. Tablica taka jest miejscem udostępniania ogłoszeń (komunikatów, wiadomości) dla ich odbiorców. Źródłami komunikatów i ich odbiorcami mogą być użytkownicy systemu stosującego tablicę ogłoszeń lub inne systemy. Komunikaty dostarczane są przez źródła komunikatów do administratora tablicy. Administrator decyduje o umieszczaniu ogłoszeń na tablicy i o usuwaniu z tablicy ogłoszeń nieaktualnych. Odbiorcy ogłoszeń obserwują tablicę i w odpowiedzi na zmianę jej stanu mogą wykonywać ustalone działania, w tym mogą kierować odpowiednie komunikaty do administratora tablicy. Koncepcja tablicy ogłoszeń, w której ogłoszenia określone były jako źródła wiedzy lub demony, została wprowadzona w systemach przeznaczonych do interpretowania mowy [9] i jest nadal rozwijana [11].

Znanych jest wiele sposobów praktycznej realizacji tablic ogłoszeń. Tablice te mogą być budowane jako hierarchicznie uporządkowane bazy danych, przeznaczone do przechowywania rozwiązań generowanych przez autonomiczne

moduły, uprawnione do użytkowania (stosowania) różnych technik wnioskowania w celu efektywnego osiągnięcia najlepszych rozwiązań [3].

## 7. SIECI STWIERDZEŃ

Przesłanki i konkluzje występujące w (1) mogą być reprezentowane w różny sposób dla potrzeb systemów doradczych. Należy zwrócić uwagę na rzadko stosowany sposób polegający na zapisywaniu ich w postaci stwierdzeń. Jest to postępowanie szczególnie dogodnie dla systemów przeznaczonych do wspomaganie diagnostyki technicznej, wymagającej między innymi rozwiązywania zadań związanych z interpretowaniem wartości danych i ich zmian.

Stwierdzenie jest informacją o uznaniu wypowiedzi orzekającej o obserwowanych faktach lub reprezentującej określoną opinię. Stwierdzenie  $s$  może być zapisywane w postaci następującej pary:

$$s = \langle c, b \rangle, \quad (2)$$

gdzie

- $c$  jest *treścią stwierdzenia*, czyli wypowiedzią o tym, że wskazanemu obiektowi przysługuje określony atrybut o ustalonej wartości,
- $b$  jest *wartością stwierdzenia* definiowaną jako stopień prawdziwości lub stopień przekonania o prawdziwości wypowiedzi będącej treścią stwierdzenia.

Zakłada się, że *treść stwierdzenia* jest stała, a *wartość stwierdzenia* może się zmieniać. Stosowanie stwierdzeń pozwala na wyraźne rozróżnianie obiektywnych faktów i wypowiedzi o występujących faktach, które bardzo często, w sposób błędny, są utożsamiane z faktami.

Stwierdzenie może być rozpatrywane jako uogólnienie pojęcia *zdanie* stosowanego w rachunku zdań, gdzie zdanie dotyczy tylko takich wypowiedzi, o których potrafimy orzec czy są prawdziwe czy fałszywe. Omawiane stwierdzenia są stwierdzeniami przybliżonymi ponieważ zbiór dopuszczalnych wartości stwierdzeń nie jest ograniczany do dwóch elementów  $\{\text{prawda}, \text{fałsz}\}$ .

W procesie wnioskowania, prowadzonym w systemie doradczym na podstawie wartości logicznych przesłanek, przyjmuje się lub odrzuca konkluzje. Rozpatrywany zbiór przesłanek i konkluzji jest zbiorem zamkniętych, ustalonym w czasie budowania bazy wiedzy. Podczas działania systemu nie są generowane lub odkrywane nowe konkluzje. Oznacza to, że procesy wnioskowania prowadzone w systemach doradczych są procesami realizowanymi w tzw. zamkniętych światach. W każdym systemie wszystkie przesłanki i konkluzje występujące w takich procesach mogą być zastąpione skończonym zbiorem stwierdzeń. Wartości tych stwierdzeń mogą być interpretowane

jako wartości logiczne zastępowanych przesłanek i konkluzji.

Rozwijając wyjściową koncepcję tablicy ogłoszeń [9] można przyjąć, że występujące na niej ogłoszenia zostaną zastąpione przez stwierdzenia tworzące sieć stwierdzeń przybliżonych. Zmiany wartości stwierdzeń będą mogły inicjować ciągi działań powodujących zmiany wartości innych stwierdzeń, umożliwiające realizowanie procesu wnioskowania. Stosowane mogą być różne sposoby wnioskowania. Sieci stwierdzeń przybliżonych mogą być na przykład rozpatrywane jako szczególne wersje sieci przekonań, co pozwala na zastosowanie metod wnioskowania opracowanych dla sieci przekonań.

Rozpatrywane stwierdzenia będą należały do jednej z następujących klas:

- *stwierdzenia pierwotne*, których wartości nie zależą (jawnie) od wartości innych stwierdzeń i są zadawane bezpośrednio przez procesy zewnętrzne (np. działające układy pomiarowe lub dialog z użytkownikiem systemu),
- *stwierdzenia wtórne*, których wartości zależą (jawnie) od wartości innych stwierdzeń występujących w sieci i nie są zadawane bezpośrednio przez procesy zewnętrzne.

Część stwierdzeń wtórnych może występować w postaci stwierdzeń ukrytych, pełniących rolę wniosków pośrednich, niedostępnych dla użytkowników systemu

Danymi wejściowymi w procesie wnioskowania w sieciach stwierdzeń są zbiory  $B_p$  wartości stwierdzeń pierwotnych należących do zbiorów stwierdzeń pierwotnych  $S_p$

$$B_p = \{b(x) : x \in S_p\}. \quad (3)$$

Celem procesu wnioskowania jest wyznaczenie wartości wszystkich lub wybranych stwierdzeń wtórnych należących do zbioru stwierdzeń wtórnych  $S_s$

$$B_s = \{b(x) : x \in S_s\}. \quad (4)$$

Ze względu na potrzebę uwzględniania zależności występujących pomiędzy stwierdzeniami, wnioskowanie w sieci stwierdzeń rozpatrywane jest najczęściej jako zadanie poszukiwania równowagi w tej sieci, dla zadanego zbioru wartości stwierdzeń pierwotnych.

## 8. WARUNKI KONIECZNE I DOSTATECZNE

Sieci stwierdzeń mogą być rozpatrywane jako szczególna wersja baz wiedzy systemów doradczych. Występujące w systemach doradczych reguły (1) zostają zastąpione przez dwie klasy warunków:

- warunki konieczne,
- warunki dostateczne (wystarczające).

Jeżeli uznaniu prawdziwości stwierdzenia  $x$  towarzyszy zawsze uznanie prawdziwości stwierdzenia  $y$ , lecz niekoniecznie odwrotnie, to  $x$  określane jest jako *warunek dostateczny* dla  $y$ . 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  $x$ . Podane definicje warunków dostatecznych i koniecznych dotyczą stwierdzeń dokładnych czyli takich, które są jednoznacznie uznane lub nie. Dla stwierdzeń przybliżonych, które mogą być uznane częściowo, czyli dla stwierdzeń  $x$  i  $y$  o wartościach  $b(x)$  i:

$$b(x) \in [0,1], \quad b(y) = [0,1]. \quad (5)$$

Informację o tym, że  $x$  jest warunkiem dostatecznym dla  $y$  lub, że  $y$  jest warunkiem koniecznym dla  $x$  możemy zapisywać [5]:

$$b(y) \geq b(x). \quad (6)$$

Warunki konieczne i dostateczne określane dla stwierdzeń dokładnych są szczególnym przypadkiem warunków określanych dla stwierdzeń przybliżonych zgodnie z (6).

Uwzględniając potrzebę stosowania reguł przybliżonych interpretowanych tak, że są one w przybliżeniu warunkami koniecznymi i dostatecznymi, czyli warunkami koniecznymi i dostatecznymi spełnianymi z jakąś (niewielką) niedokładnością, można przekształcić warunek (6) do postaci przybliżonej:

$$b(y) \geq b(x) - \delta; \quad \delta \geq 0, \quad (7)$$

gdzie  $\delta$  jest wspólną dla wszystkich rozpatrywanych warunków, graniczną nieujemną wartością parametru, określającego dopuszczalny stopień przybliżenia (niedokładności) warunku. Dla warunku dokładnego  $\delta=0$ .

## 9. FORMALNA POPRAWNOŚĆ BAZ WIEDZY

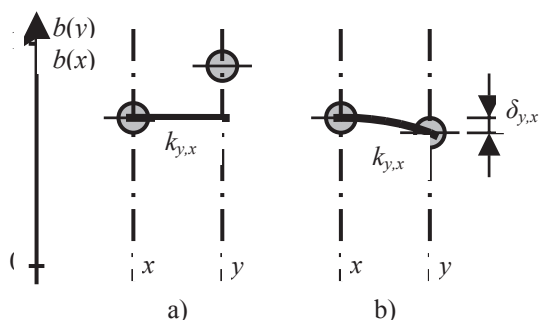
Bazy wiedzy systemów doradczych powinny zawierać wyłącznie elementy niesprzeczne. Formalna poprawność baz wiedzy powinna być przedmiotem weryfikacji w czasie budowania i eksploatacji systemu. W bazach wiedzy stosujących reguły wykrywanie reguł sprzecznych jest zadaniem prostym wtedy gdy rozpatrywane są systemy doradcze stosujące dokładne przesłanki i dokładne reguły. Niestety, jest to zadanie trudne dla przybliżonych systemów doradczych. W celu jego uproszczenia zakłada się, że ewentualne reguły sprzeczne mogą być wykrywane w czasie działania systemu dla ustalonego przypadku, czyli dla znanego zbioru uznanych przesłanek. Dla omawianych przybliżonych warunków koniecznych i dostatecznych można zastosować postępowanie

podobne. Polega ono na poszukiwaniu minimalnej wartości parametru  $\delta$  w (7), zapewniającej spełnienie wszystkich rozpatrywanych warunków koniecznych i dostatecznych.

Proces wnioskowania z uwzględnieniem warunków koniecznych i dostatecznych polega na poszukiwaniu stanu równowagi w sieci stwierdzeń. Wymaga to rozwiązania zadania programowania dynamicznego. Dla rozpatrywanego przypadku wyznaczona minimalna wartość parametru  $\delta$  może być również interpretowana jako ocena stopnia sprzeczności uwzględnianego zbioru warunków przybliżonych, czyli ocena stopnia sprzeczności występujących pomiędzy elementami bazy wiedzy.

## 10. MODEL SIECI STWIERDZEŃ

W celu rozwinięcia omawianych metod wnioskowania w sieciach stwierdzeń, rozpatrujemy model będący analogią mechaniczną tych sieci. Przyjmijmy, że stwierdzenia będące elementami sieci stwierdzeń, reprezentowane są przez punkty materialne, które mogą się przemieszczać. Punkty te można przedstawiać graficznie jak na rys. 1 zakładając, że mogą się one przemieszczać wyłącznie w kierunku pionowym, podczas gdy ich odległości w kierunku poziomym są zerowe. Na rys. 1 punkty te pokazano jako "rozsunięte" w kierunku poziomym, wyłącznie w celu umożliwienia ich porównywania i niezależnego obserwowania każdego z nich. Wysokość, na której zlokalizowano każdy z tych punktów, odpowiada wartości stwierdzenia i należy do przedziału  $[0, 1]$ . Stwierdzenia w pełni uznane za prawdziwe reprezentowane są przez punkty położone na wysokości równej 1. Stwierdzenia uznane za fałszywe reprezentowane są przez punkty położone na wysokości równej 0.



Rys. 1. Model reprezentujący warunek dostateczny dla pary stwierdzeń  $x$  i  $y$ .  
a) spełniony warunek dokładny (6),  
b) spełniony warunek przybliżony (8)

Warunki konieczne i dostateczne reprezentowane są przez więzy jednostronne nałożone na rozpatrywane punkty i odpowiadające nierównościom (8).

$$b(y) \geq b(x) - \delta_{y,x}; \quad \delta_{y,x} \geq 0 \quad (8)$$

Nierówność (8) uzyskano w wyniku modyfikacji nierówności (7), polegającej na indywidualizacji parametru  $\delta$  i założeniu, że może on przyjmować różne wartości dla kolejnych par stwierdzeń związanych z omawianymi warunkami. Na rys. 1 pokazano element podatny o sztywności  $k_{y,x}$ , który jest zginany wtedy gdy warunek konieczny lub dostateczny (6) musi być uwzględniany jako warunek przybliżony (8) częściowo sprzeczny z innymi warunkami, tzn. wtedy gdy  $\delta_{y,x} > 0$ .

Wprowadzone sztywności  $k_{y,x}$  umożliwiają różnicowanie ważności warunków przybliżonych. Są one jednostkowymi kosztami ewentualnych występujących sprzeczności warunków. Mogą przyjmować równe wartości (np. 1.0), wtedy gdy brak potrzeb różnicowania ważności warunków. Sumaryczny koszt sprzeczności występujących pomiędzy elementami bazy wiedzy:

$$E = \sum_{(y,x)} \delta_{y,x} k_{y,x}, \quad (9)$$

może być interpretowany jako energia potencjalna rozpatrywanego zbioru punktów.

Wnioskowanie w rozpatrywanym modelu sieci stwierdzeń polega na poszukiwaniu stanu równowagi, któremu odpowiada minimalna energia potencjalna  $E$  wg (9). Należy zwrócić uwagę, że nieliniowy charakter więzów reprezentujących warunki (więzy jednostronne) powoduje, iż poszukiwanie stanu równowagi sieci jest zadaniem nieliniowym.

## 11. SIECI STWIERDZEŃ DYNAMICZNYCH

Wspólną cechą opisanych systemów doradczych, sieci przekonań i sieci stwierdzeń jest to, że systemy te stosują statyczne bazy wiedzy i nie posiadają pamięci umożliwiającej wykorzystanie historii ich działań w procesie wnioskowania. Wynik ich działania wyznaczany jest niezwłocznie, bezpośrednio w odpowiedzi na zmianę danych wejściowych. Wyniki działania sieci przekonań i sieci stwierdzeń nie zależą od kolejności zmian danych wejściowych. Nie odpowiada to w pełni procesom wnioskowania prowadzonym przez człowieka.

Podczas wyciągania wniosków na podstawie zbioru dostępnych stwierdzeń człowiek często uwzględnia nie tylko wartości stwierdzeń ale również charakter ich zmian i czasokres utrzymywania się tych wartości bez zmian. Należy zauważyć, że często wyciągamy wnioski (uznajemy stwierdzenia) z pewnym opóźnieniem względem chwili, w której poznaliśmy przesłanki. Opóźnienie takie dotyczy również wniosków pośrednich i może wpływać jakościowo na przebieg złożonego procesu wnioskowania, zwłaszcza wtedy gdy dla

uwzględnianego zbioru warunków istnieje wiele (kilka) rozwiązań statycznych. Występowanie opóźnień wniosków pośrednich może stwarzać między innymi warunki pozwalające na rozróżnianie stanów technicznych charakteryzujących się identycznymi symptomami w stanach ustalonych i różniącymi się wyłącznie przebiegami czasowymi zmian symptomów w stanach przejściowych. Opóźnienia pozwalają również na ograniczanie wpływu zakłóceń na wynik procesu wnioskowania.

Podczas budowania systemów stosujących sieci stwierdzeń można wprowadzać układy wstępnego przetwarzania danych, występujące w postaci filtrów dolnoprzepustowych pomiędzy stwierdzeniami pierwotnymi i odpowiadającymi im źródłami danych. Filtry takie umożliwiają uśrednianie danych wejściowych i pozwalają na uzyskanie omawianego opóźnienia. Zastosowanie podobnych filtrów w celu opóźnienia stwierdzeń wtórnych jest zadaniem bardzo trudnym.

W celu uzyskania możliwości wpływania na dynamikę zmian wartości stwierdzeń wtórnych w procesach wnioskowania w sieciach stwierdzeń, wprowadza się pojęcie *stwierdzenia dynamicznego*. Istotą proponowanej modyfikacji jest uwzględnienie bezwładności stwierdzenia, decydującej o czasie niezbędnym na dokonanie zmiany wartości stwierdzenia wtórnego. Zakłada się, że bezwładność jest cechą stwierdzenia, której wartość jest stała. Stwierdzenia wtórne o dużych bezwładnościach będą zmieniały swoje wartości wolniej niż stwierdzenia wtórne o małych bezwładnościach.

Modelem sieci zawierającej stwierdzenia dynamiczne, czyli modelem sieci stwierdzeń dynamicznych, może być zmodyfikowany model sieci stwierdzeń. Modyfikacja tego modelu polega na przypisaniu mas punktom materialnym, reprezentującym stwierdzenia. W tak przedstawianej sieci możliwe jest realizowanie procesów wnioskowania, polegających na propagacji zmian wartości stwierdzeń, rozpatrywanych jako przemieszczenia oddziaływujących na siebie punktów materialnych o określonych masach.

## WNIOSKI

Procesy wnioskowania w systemach diagnostycznych wymagają wspomagania za pomocą systemów bazujących na wiedzy. Szczególne znaczenie, ze względu na możliwości zastosowania, mają systemy doradcze, w których baza wiedzy zorganizowana jest w postaci sieci stwierdzeń. Należy oczekiwać, że zastosowanie znajdą również sieci stwierdzeń dynamicznych pozwalających na wprowadzanie bezwładności stwierdzeń. Zagadnienia dotyczące metod definiowania oraz stosowania tych sieci wymagają dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] Bubnicki Z.: *Wstęp do systemów ekspertowych*, PWN, Warszawa 1990.
- [2] Charniak E.: *Bayesian networks without tears*. AI Magazine Vol.12 (1991), No.4, s.50-63.
- [3] Cholewa W.: *Tablice ogłoszeń w diagnostycznych systemach doradczych*. Pomiary, Automatyka, Kontrola. 1998, nr 4, s.123-128.
- [4] Cholewa W.: *Wnioskowanie przybliżone w dynamicznych systemach doradczych*. w: "Zbiory rozmyte i ich zastosowanie" red. J. Chojcan, J. Łęski. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [5] Cholewa W.: *Systemy doradcze w diagnostyce technicznej*. w: "Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania". WNT, Warszawa 2002, rozdz. 15, s.543-580.
- [6] Cholewa W., Czogała E.: *Podstawy systemów ekspertowych*. Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN, nr 28, Warszawa 1989.
- [7] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.
- [8] Chromiec J., Strzemieczna E.: *Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994 (wydanie drugie zmienione 1995).
- [9] Englemore R., Morgan T. (eds): *Blackboard systems*. Addison-Wesley 1988.
- [10] Hajnicz E.: *Reprezentacja logiczna wiedzy zmieniającej się w czasie*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1996.
- [11] Hayes-Roth B.: *An architecture for adaptive intelligent systems*. Artificial Intelligence, Vol.72 (1995), s.329-365.
- [12] Henrion M., Breese J. S., Horvitz E. J.: *Decision analysis and expert systems*. AI Magazine, Vol. 12 (1991), No.4, s.64-91.
- [13] Isham V.: *An introduction to spatial point processes and Markov random fields*. Intl. Statist. Review, 49 (1981), s.21-43.
- [14] Jagielski J.: *Inżynieria wiedzy w systemach ekspertowych*. Lubuskie Towarzystwo Naukowe, Zielona Góra 2001.
- [15] Jensen F. V.: *Bayesian networks and decision graphs*. Springer 2001.
- [16] Kuncheva L.: *Fuzzy classifier design*. Physica-Verlag, Heidelberg 2000.
- [17] Lauritzen S. L.: *Lectures on contingency tables*. 2nd ed. University of Aalborg Press, Aalborg 1982.
- [18] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.

- [19] Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [20] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy diagnostycznej*. w: "Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania". WNT, Warszawa 2002, rozdz. 17, s.623-664.
- [21] Mulawka J. J.: *Systemy ekspertowe*. WNT, Warszawa 1996.
- [22] Negnevitsky M.: *Artificial intelligence. A guide to intelligent systems*. Addison-Wesley, 2002.
- [23] Niederliński A.: *Regulowe systemy ekspertowe*. Wyd. Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego. Gliwice 2000.
- [24] Pearl J.: *Probabilistic reasoning in intelligent systems. Networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann, San Mateo 1988.
- [25] Rutkowski L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. PWN, Warszawa 2005.
- [26] Siler W., Buckley Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning. John Wiley, New Jersey 2005.
- [27] Wright S.: *The method of path coefficients*. Ann. Math. Statistics. 5 (1934), s. 161-215.



Prof. dr hab. inż.  
**Wojciech CHOLEWA**  
prowadzi badania  
dotyczące diagnostyki  
technicznej, ze szczegól-  
nym uwzględnieniem  
metod pomiaru i analizy  
sygnałów oraz metod  
wnioskowania diagnosty-  
cznego. Rozwija metody  
i techniki sztucznej

inteligencji związane z reprezentowaniem oraz przetwarzaniem wiedzy niepewnej i przybliżonej. Jest autorem publikacji dotyczących dynamicznych systemów doradczych budowanych dla potrzeb diagnostyki technicznej oraz wspomagania procesów projektowania i konstruowania maszyn.

Jest członkiem Komitetu Budowy Maszyn PAN oraz członkiem zwyczajnym Akademii Inżynierskiej w Polsce.