

Wojciech CHOLEWA, Damian SKUPNIK

KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN, WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY, POLITECHNIKA ŚLĄSKA,
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

Badania porównawcze wielomodalnych sieci stwierdzeń

Prof. dr hab. inż. Wojciech CHOLEWA

Kierownik Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn w Politechnice Śląskiej, rozwija metody i techniki sztucznej inteligencji związane z reprezentowaniem oraz przetwarzaniem wiedzy niepewnej i przybliżonej dla potrzeb diagnostyki technicznej oraz wspomaganie procesów projektowania i konstruowania maszyn. Rozwija teorię systemów doradczych budowanych z zastosowaniem sieci stwierdzeń oraz odwrotnych modeli obiektów.



e-mail: Wojciech.Cholewa@polsl.pl

Dr inż. Damian SKUPNIK

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn w Politechnice Śląskiej. Prowadzi badania, które dotyczą głównie diagnostyki złożonych obiektów technicznych, a w szczególności zajmuje się opracowywaniem modeli diagnostycznych z zastosowaniem metod i technik sztucznej inteligencji umożliwiających przetwarzanie informacji niepełnej oraz niepewnej.



e-mail: Damian.Skupnik@polsl.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy badań porównawczych wielomodalnych sieci stwierdzeń. Przedstawiono definicje sieci stwierdzeń oraz sieci wielomodalnej. Pokazano, że szczególną wersją sieci stwierdzeń może być sieć przekonań lub sieć warunków koniecznych i dostatecznych. Prezentowane sieci wielomodalne zostały opracowane w szkieletowym systemie doradczym MMNET i dotyczą diagnozowania stanu technicznego obiektu stanowiącego fizyczną miniaturyzację instalacji przemysłowej stosowanej, np. w przemyśle chemicznym. Przeprowadzone badania porównawcze pozwoliły określić zalety i wady badanych sieci.

Słowa kluczowe: sieć stwierdzeń, sieć przekonań, sieć wielomodalna, system MMNET.

Comparative studies of multimodal statement networks

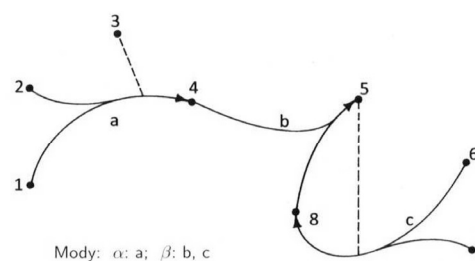
Abstract

The paper deals with comparative studies of multimodal statement networks. Section 1 contains description of the concept of a multimodal network and a statement. A belief (Bayesian) network as well as a network of necessary and sufficient conditions (exact and approximate) are briefly described in Section 2. Section 3 is the most important part of the paper. It shows that the considered networks can be constructed by means of the MMNET system [4]. Fig. 3 presents the considered technical object which exemplifies a physical miniaturization of an industrial installation used, e.g. in a chemical or food industry. The object operation is illustrated in Fig. 4. It was decided to consider 12 possible technical states of the object including so-called complex states, i.e. the cases when at least 2 elements of the object were faulty. Active diagnostic experiments were conducted in order to obtain sets of data necessary for identification of the examined networks (diagnostic models). Comparison was performed on the basis of the results obtained from the identified models (e.g. Tabs. 2, 3 and 4). In consequence, it was possible to determine advantages and disadvantages of the networks. Tab. 5 shows that comparison. Belief networks are used in many different domains also in technical diagnostics. It seems that multimodal statement networks exemplify an interesting alternative because they have got many advantages especially a possibility of constructing models as a result of integration of independently identified component networks and a possibility of reasoning on the basis of inaccurate and partly contradictory data.

Keywords: statement network, belief network, multimodal network, MMNET system.

1. Wprowadzenie

Najogólniej rzecz ujmując sieć wielomodalna to graf lub hipergraf skierowany, w którym równocześnie uwzględniane są różne rodzaje oddziaływania (tzw. mody) występujące pomiędzy elementami sieci. Rys. 1 przedstawia przykład sieci wielomodalnej reprezentowanej w postaci trójki (V, E, Γ) , gdzie $V = \{1, 2, \dots, 8\}$ to zbiór wierzchołków, $E = \{a, b, c\}$ zbiór hiperkrawędzi modalnych oraz $\Gamma = \{\alpha, \beta\}$ zbiór modów hiperkrawędzi. Więcej szczegółów na ten temat można znaleźć w [1, 2, 3].

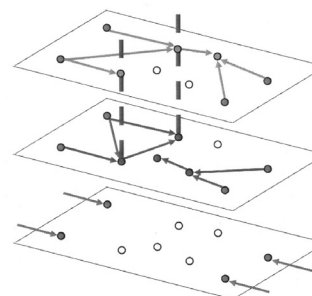


Rys. 1. Przykład sieci wielomodalnej (na podstawie [2])
Fig. 1. An example of a multimodal network (on the basis of [2])

Węzłami sieci wielomodalnej mogą być *stwierdzenia*, tzn. zdania oznajmujące, interpretowane jako wypowiedzi o zaobserwowanych faktach lub reprezentujące określoną opinię, które przyjmują różne wartości (np. prawda, fałsz, stopień możliwości, konieczności, przekonania o słuszności) [4]. Stwierdzenie s może być zapisywane w postaci następującej pary

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

gdzie c jest treścią stwierdzenia (np. *Zbiornik paliwa jest pusty*) oraz v jest wartością stwierdzenia (np. elementem ze zbioru {prawda, fałsz} lub liczbą z przedziału $[0; 1]$ interpretowaną jako stopień przekonania o prawdziwości wypowiedzi będącej treścią stwierdzenia).



Rys. 2. Przykład sieci wielowarstwowej
Fig. 2. An example of a multilayer network

W wielomodalnej sieci stwierdzeń relacje (zależności) występujące pomiędzy stwierdzeniami mogą należeć do różnych klas, reprezentując różne aspekty wiedzy, obowiązujące dla różnych założeń. Szczegółowe przedstawianie wszystkich relacji prowadzi najczęściej do nadmiernego wzrostu rozmiaru sieci (tzn. liczby węzłów i gałęzi) utrudniając tym samym proces jej tworzenia. Zadanie to można rozwiązać poprzez reprezentację wielomodalnej sieci stwierdzeń w postaci wielowarstwowej (rys. 2), charakteryzującej się tym, że wybrane węzły niezależnie budowanych sieci

składowych mogą należeć równocześnie do kilku warstw [5]. W takim wypadku wartość stwierdzenia reprezentowanego przez węzeł występujący równocześnie w kilku warstwach może być wyznaczana w wyniku agregacji wartości węzłów z kolejnych warstw [6, 7] lub w wyniku uzgadniania tych wartości [5].

2. Rozpatrywane sieci stwierdzeń

Sposoby wnioskowania w sieci stwierdzeń muszą być dopasowane do przyjętych definicji wartości stwierdzeń. Wobec powyższego zdecydowano, że badaniom porównawczym poddana zostanie przybliżona sieć stwierdzeń, których wartości interpretowane są jako stopnie przekonania o prawdziwości ich treści, oraz sieć reprezentująca przybliżone warunki konieczne i dostateczne. Warto zauważyć, że pierwszą z wymienionych sieci można uznać za szczególną wersję sieci przekonań.

2.1. Sieć przekonań (sieć bayesowska)

Sieć przekonań jest niezawierającym cykli grafem skierowanym, którego węzły reprezentują zmienne, identyfikujące hipotezy oraz obserwacje, a skierowane gałęzie reprezentują związki pomiędzy tymi zmiennymi. Hipotezy i obserwacje mogą być zapisane w postaci stwierdzeń, wówczas skierowane gałęzie dotyczą relacji pomiędzy stwierdzeniami. Określenie tych relacji realizowane jest poprzez przypisanie węzłom sieci, tablic prawdopodobieństw warunkowych. Zbiór tablic prawdopodobieństw warunkowych oraz prawdopodobieństw a priori umożliwia wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa łącznego, a więc cała sieć reprezentuje w oszczędny sposób łączny rozkład prawdopodobieństwa dla wszystkich zmiennych [8].

Wnioskowanie w sieci przekonań polega na wyznaczeniu nieznanymi wartości dowolnych zmiennych (stwierdzeń) na podstawie znanych wartości innych zmiennych.

2.2. Sieć warunków koniecznych i dostatecznych

Stosowanie sieci przekonań wymaga wyznaczenia odpowiednich tablic prawdopodobieństw warunkowych. Na ogół jest to zadanie trudne. Prostsze podejście do określenia relacji (związków) pomiędzy stwierdzeniami polega na użyciu metod pozwalających reprezentować wiedzę w postaci warunków koniecznych i wystarczających (dostatecznych), a więc z zastosowaniem elementów logiki modalnej.

Stwierdzenie s_p określane jest jako warunek dostateczny dla stwierdzenia s_n , jeżeli przekonaniu o prawdziwości stwierdzenia s_p towarzyszy zawsze przekonanie o prawdziwości stwierdzenia s_n , przy czym relacja odwrotna nie musi być prawdziwa. Jednocześnie s_n określane jest jako warunek konieczny dla s_p .

Zakładając, że stopień przekonania $b(\cdot)$ o prawdziwości wypowiedzi będących treścią stwierdzeń s_p i s_n przyjmują wartości $b(s_p) \in [0; 1]$ oraz $b(s_n) \in [0; 1]$, informację o tym, że s_p jest warunkiem dostatecznym dla s_n można zapisać jako

$$b(s_p) \leq b(s_n). \quad (2)$$

Szczegóły dotyczące wnioskowania w sieciach warunków koniecznych i dostatecznych można znaleźć w [4].

2.3. Uogólniona (przybliżona) sieć stwierdzeń

Przybliżona sieć stwierdzeń stanowi uogólnienie sieci warunków koniecznych i dostatecznych. Bazuje ona na przyjęciu założenia, że zależność (2) może być spełniona z jakąś niewielką, dopuszczalną odchyłką. Wartość tej odchyłki może być przyjmowana w różny sposób [4], np. jako δ_{ij} przypisywana indywidualnie do każdego warunku określanego dla pary stwierdzeń s_i i s_j ,

przy czym nie wymaga się aby $\delta_{ij} = \delta_{ji}$. Wówczas warunek (2) przyjmuje następującą postać:

$$b(s_p) - \delta_{i,j} \leq b(s_n), \quad (3)$$

gdzie $\delta_{ij} \geq 0$. Przyjęcie (3) pozwala realizować proces wnioskowania w warunkach występujących bardzo często w praktyce, tzn. dla nieprecyzyjnych, niekompletnych a nawet częściowo sprzecznych informacji.

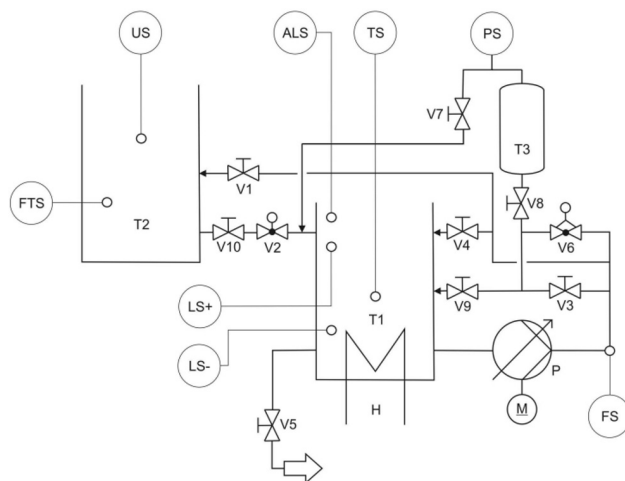
W ogólnym zbiorze stwierdzeń, na których rozpięta jest sieć, występują stwierdzenia o znanych wartościach (pozyskanych z różnych źródeł, np. elementów układu pomiarowego) oraz o wartościach nieznanymi, które mogą być rozpatrywane jako niewiadome w układach nierówności, np. w postaci (3). Rozwiązania tych układów mogą być wyznaczane w wyniku poszukiwania minimum przyjętej funkcji kryterialnej e , którą dla warunków w postaci (3) można zdefiniować jako

$$e = \sum_{i,j} k_{i,j} \delta_{i,j}, \quad (4)$$

gdzie $k_{ij} \geq 0$ to waga przypisana warunkowi określonemu dla pary stwierdzeń s_i i s_j . Poszukiwanie minimum tej funkcji może być rozpatrywane jako zadanie programowania liniowego (optymalizacji liniowej), które można rozwiązać za pomocą wielu znanych algorytmów.

3. Porównanie wybranych sieci wielomodalnych

Prezentowane badania porównawcze wielomodalnych sieci stwierdzeń obejmują sieci bayesowskie oraz sieci reprezentujące przybliżone warunki konieczne i dostateczne. Rozpatrywane sieci zostały opracowane w systemie MMNET [4] na podstawie danych, które zostały wybrane z licznego zbioru utworzonego podczas tzw. czynnych eksperymentów diagnostycznych (opisanych w [9]). Eksperymenty przeprowadzono na stanowisku badawczym będącym fizyczną miniaturyzacją instalacji przemysłowej stosowanej, np. w przemyśle chemicznym, spożywczym itp.



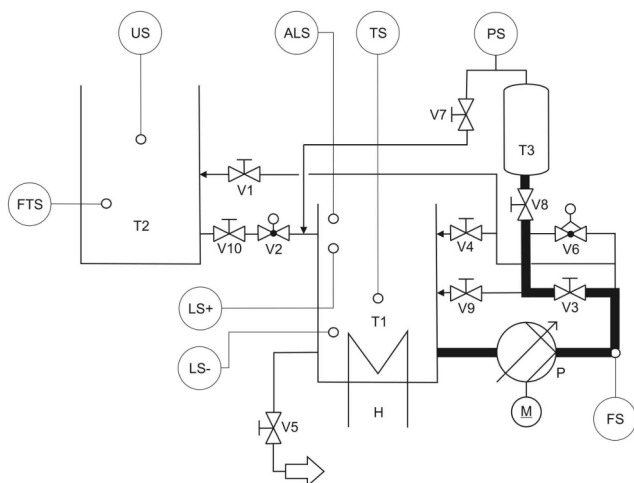
Rys. 3. Schemat rozpatrywanego obiektu technicznego (ALS przełącznik pływakowy poziomu alarmowego, FS czujnik natężenia przepływu cieczy, FTS przełącznik pływakowy, H grzałka, LS- czujnik zbliżeniowy dolny, LS+ czujnik zbliżeniowy górny, M silnik, P pompa odśrodkowa, PS czujnik ciśnienia, T1, T2 odpowiednio zbiornik dolny i górny, T3 zbiornik ciśnieniowy, TS czujnik temperatury, US ultradźwiękowy czujnik poziomu, V2 zawór kulowy, V6 zawór proporcjonalny, Vi zawory ręczne)

Fig. 3. Structure chart of the considered technical object (ALS alarm float switch, FS flow sensor, FTS float switch, H heater, LS- lower proximity sensor, LS+ upper proximity sensor, M engine, P pump, PS pressure sensor, T1, T2 respectively lower and upper tank, T3 pressure tank, TS temperature sensor, US ultrasonic level sensor, V2 ball valve, V6 proportional valve, Vi manual valve)

3.1. Rozpatrywany obiekt techniczny

Budowę rozpatrywanego obiektu technicznego przedstawia w sposób schematyczny rys. 3.

Działanie obiektu sterowane jest programem, który wykonywany jest przez sterownik PLC i dotyczy regulacji ciśnienia powietrza w zbiorniku T3. Po uruchomieniu programu pompa P pompuje przez 20 sekund ciecz ze zbiornika T1 do zbiornika T3. W wyniku tej operacji ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 zostaje zwiększone o 200 mbar (poziomem odniesienia jest ciśnienie powietrza w otoczeniu obiektu). W celu osiągnięcia i ustabilizowania wymaganej wartości ciśnienia, zastosowano regulator PID. Rys. 4 przedstawia w sposób schematyczny przepływ cieczy podczas sprężania powietrza w zbiorniku T3.



Rys. 4. Przepływ cieczy podczas sprężania powietrza w zbiorniku T3
Fig. 4. The flow of liquid during compression of air in the tank T3

3.2. Zbiór rozpatrywanych stanów technicznych

Stanowisko badawcze umożliwia symulowanie uszkodzeń. Rozpatrywano zbiór następujących 4 prostych stanów technicznych:

- obiekt sprawny,
- pompa P nie pompuje poprawnie,
- kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo lub całkowicie przytkany,
- zbiornik T3 jest nieszczelny.

Zrezygnowano z rozpatrywania uszkodzeń toru pomiarowego, zarówno w odniesieniu do czujnika ciśnienia PS, natężenia przepływu FS jak i sterownika PLC, z uwagi na brak części ruchomych, które mogłyby ulec przyspieszonemu zużyciu. Możliwe jest jednak wystąpienie sytuacji, gdy w tym samym czasie uszkodzone są 2 lub nawet 3 elementy obiektu (w skrajnym wypadku niedziałająca pompa, całkowicie przytkany kanał oraz nieszczelny zbiornik). W związku z tym liczba wszystkich rozpatrywanych prostych i złożonych stanów technicznych w prezentowanym przykładzie wynosi 12.

3.3. Przygotowanie zbioru danych

Pozyskanie wiarygodnych danych w celu identyfikacji struktur i parametrów rozpatrywanych sieci stwierdzeń jest w prezentowanym przykładzie wyjątkowo ułatwione, ponieważ dysponowano fizycznym modelem instalacji przemysłowej, na którym możliwe było przeprowadzenie serii czynnych eksperymentów diagnostycznych. W wyniku przeprowadzonych badań zgromadzono łącznie 19 przykładów dotyczących wszystkich rozpatrywanych

stanów technicznych (8 przykładów dla stanu bazowego oraz po 1 przykładzie dla pozostałych 11 stanów technicznych).

3.4. Identyfikacja warstw („modów”) sieci stwierdzeń

Obiektywna identyfikacja „modów” sieci wielomodalnej nie jest zadaniem prostym. W prezentowanym przykładzie podjęto próbę rozwiązania tego zadania za pośrednictwem modelu obiektu zapisanego z zastosowaniem języka UML. Język ten umożliwia tworzenie zestawu diagramów, za pomocą których określana jest z różnych punktów widzenia struktura i/lub dynamika działania modeli reprezentujących realne obiekty z wybranego fragmentu otoczenia (np. osoby, przedmioty, jednostki organizacyjne, zdarzenia itp.). W szczególnym wypadku można go użyć do precyzyjnego i jednoznacznego opisu działania rozpatrywanego obiektu technicznego [10].

Na podstawie analizy modelu obiektu zapisanego z zastosowaniem języka UML przyjęto, że tworzona w systemie MMNET sieć wielomodalna będzie składać się z następujących 3 warstw:

- W1 – dotyczy stanu funkcjonalnego obiektu,
- W2 – dotyczy działania wybranych elementów obiektu,
- W3 – dotyczy harmonogramu działania wybranych elementów obiektu.

3.5. Identyfikacja struktur sieci stwierdzeń

W systemie MMNET węzły sieci wielomodalnej reprezentują stwierdzenia, a więc zdania oznajmujące, którym można przypisać wartość logiczną lub stopień przekonania o prawdziwości ich treści. W związku z powyższym przed identyfikacją struktur sieci konieczne jest przygotowanie odpowiedniego słownika stwierdzeń, tzw. tezaurusa.

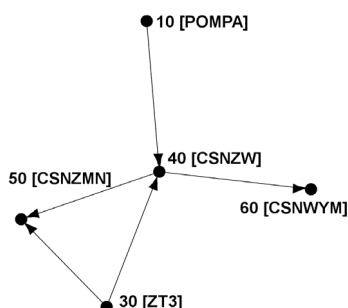
Na podstawie analizy rozpatrywanych stanów technicznych obiektu oraz cech sygnałów diagnostycznych przyjęto zbiór 9 stwierdzeń. W tab. 1 przedstawiono ich treść (w nawiasach podano skróconą nazwę).

Tab. 1. Tezaurus dla rozpatrywanego przykładu
Tab. 1. Thesaurus for the considered example

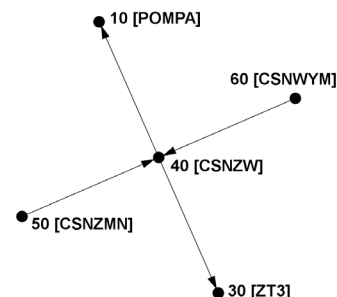
ID	TREŚĆ STWIERDZENIA
10	Pompa działa prawidłowo [POMPA]
20	Kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest drożny [KNPTK]
30	Zbiornik T3 jest szczelny [ZT3]
40	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest zwiększane [CSNZW]
50	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest zmniejszane [CSNZMN]
60	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest sprężone do wymaganej wartości [CSNWYM]
70	Wartość natężenia przepływu ma oczekiwany przebieg [NPPRZ]
80	Wartość wielkości sterowanej ma oczekiwany przebieg [WSPRZ]
90	Czas zwiększania ciśnienia w zbiorniku T3 jest dopuszczalny [CZWC-SN]

3.5.1. Struktury sieci przekonań

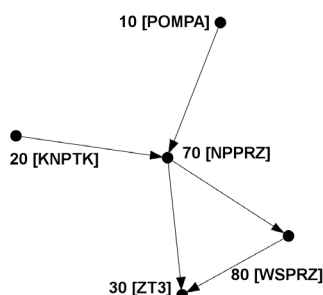
Identyfikacji struktur sieci przekonań dokonano w środowisku MATLAB. Użyto algorytmu K2 dla przygotowanego wcześniej zbioru danych, przy czym z uwagi na niewielką liczbę węzłów sieci w danej warstwie rozpatrywano wszystkie możliwe permutacje kolejności tych węzłów. W rezultacie otrzymano kilka różnych struktur równoważnych sieci dla danej warstwy. Rys. 5, 6, 7 przedstawiają wybrane struktury sieci przekonań dla kolejnych warstw sieci wielomodalnej.



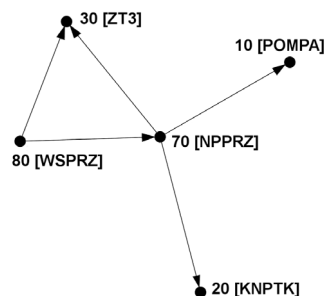
Rys. 5. Struktura sieci przekonań w warstwie W1
Fig. 5. Belief network structure in the layer W1



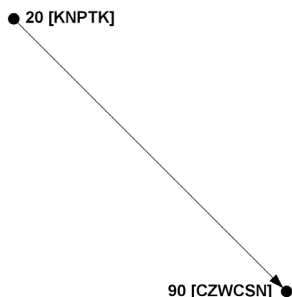
Rys. 8. Struktura przybliżonej sieci stwierdzeń w warstwie W1
Fig. 8. Approximate statement network structure in the layer W1



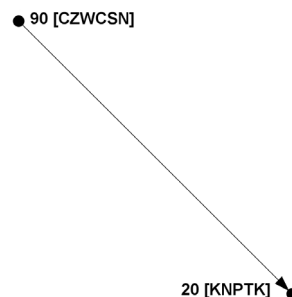
Rys. 6. Struktura sieci przekonań w warstwie W2
Fig. 6. Belief network structure in the layer W2



Rys. 9. Struktura przybliżonej sieci stwierdzeń w warstwie W2
Fig. 9. Approximate statement network structure in the layer W2



Rys. 7. Struktura sieci przekonań w warstwie W3
Fig. 7. Belief network structure in the layer W3



Rys. 10. Struktura przybliżonej sieci stwierdzeń w warstwie W3
Fig. 10. Approximate statement network structure in the layer W3

3.5.2. Struktury przybliżonych sieci stwierdzeń

Podczas identyfikacji struktur przybliżonych sieci stwierdzeń należy bardzo starannie określać zwroty krawędzi w grafie w celu zapewnienia niemalejącego uporządkowania wartości stopni przekonania o wypowiedziach będących treścią rozpatrywanych stwierdzeń (łączonych wierzchołków grafu).

Ze względu na potrzebę ułatwienia porównania wybranych sieci wielomodalnych zdecydowano, że struktury przybliżonych sieci stwierdzeń zostaną opracowane poprzez modyfikację zidentyfikowanych wcześniej struktur sieci przekonań. Należy jednak podkreślić, że identyfikacja struktur przybliżonych sieci stwierdzeń wyłącznie na podstawie analizy występowania warunków dostatecznych i koniecznych w ogólnym wypadku nie stwarza większych trudności, może być przeprowadzona na podstawie wiedzy specjalisty i nie ma potrzeby stosowania w tym celu jakiegokolwiek algorytmu. Na rys. 8, 9 i 10 przedstawiono opracowane struktury przybliżonych sieci stwierdzeń.

Jak widać struktury sieci stwierdzeń z warstw dotyczących działania wybranych elementów obiektu (odpowiednio rys. 6, rys. 9) a także z warstw dotyczących harmonogramu działania wybranych elementów obiektu (odpowiednio rys. 7, rys. 10) są sobie równoważne pod warunkiem, że rozpatrywane byłyby jako sieci przekonań, gdzie zwrot gałęzi nie jest istotny (po spełnieniu, jak w prezentowanym przykładzie, odpowiednich warunków przedstawionych, np. w [11]). Struktury te nie są jednak równoważne w odniesieniu do przybliżonych sieci stwierdzeń, ponieważ sieci z rys. 6 oraz rys. 7 nie reprezentują warunków dostatecznych i koniecznych.

Struktura przybliżonej sieci stwierdzeń dotyczącej stanu funkcjonalnego obiektu (rys. 8) różni się od odpowiadającej jej sieci przekonań (rys. 5), gdyż nie występuje w niej krawędź łącząca wierzchołki oznaczone numerami 30 i 50. Związane jest to z niemożliwością określenia związku o charakterze warunku dostatecznego lub koniecznego pomiędzy stwierdzeniami *Zbiornik T3 jest szczelny* oraz *Cisnienie powietrza w zbiorniku T3 jest zmniejszane*. W prezentowanym przykładzie zmniejszanie ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 przy działającej pompie nie oznacza wcale, że zbiornik jest nieszczelny. Również nieszczelność zbiornika nie stanowi warunku dostatecznego na to aby ciśnienie zmniejszyło się, ponieważ w takim wypadku ciśnienie w ogóle nie

wzrośnie ponad wartość początkową równą ciśnieniu atmosferycznemu w otoczeniu obiektu.

3.6. Identyfikacja wartości parametrów sieci stwierdzeń

Wartości parametrów rozpatrywanych sieci stwierdzeń zostały określone na podstawie zbioru danych użytego wcześniej do identyfikacji struktur sieci.

3.6.1. Parametry sieci przekonań

Podobnie jak w przypadku identyfikacji struktur sieci przekonań, tablice prawdopodobieństw warunkowych zostały określone w środowisku MATLAB. Wstępne oszacowania poszukiwanych wartości prawdopodobieństw warunkowych dokonano w oparciu o rozkład Dirichleta (zakładając brak jakiegokolwiek wiedzy), a następnie zaktualizowano te wartości w oparciu o zbiór danych.

3.6.2. Parametry przybliżonych sieci stwierdzeń

Przybliżone sieci stwierdzeń o rozmiarach porównywalnych z sieciami przekonań wymagają określenia znacznie mniejszej liczby parametrów. Z równania (4) wynika, że konieczne jest określenie jedynie wag k_{ij} przypisanych poszczególnym krawędziom w grafie, tzn. warunkom określonym dla odpowiedniej pary stwierdzeń. Jeżeli nie dysponuje się jakąkolwiek wiedzą na ten temat, to można przyjąć, że wszystkie wagi są dodatnie i sobie równe.

Warto zauważyć, że w przypadku braku występowania elementów sprzecznych, tzn. gdy $\forall i,j: \delta_{ij} = 0$, przybliżoną sieć stwierdzeń można rozpatrywać jako dokładną. Wówczas sieć rozwiązywana jest w oparciu o układ nierówności (2), a więc do uzyskania wyników nie są potrzebne żadne inne parametry.

3.7. Określenie wyjścia sieci stwierdzeń

W systemie MMNET wyjście wielomodalnej sieci stwierdzeń ulokowane jest w tzw. warstwie zerowej W0, gdzie znajdują się stwierdzenia z wszystkich sieci znajdujących się w zdefiniowanych wcześniej warstwach. Dla sieci przekonań stwierdzeniem zawartym w warstwie zerowej przypisane są zagregowane wartości stopni przekonań o prawdziwości tych stwierdzeń, przy czym wybranym operatorem agregacji może być, np. średnia ważona. W odniesieniu do przybliżonej sieci stwierdzeń końcowe wartości uzyskiwane są w wyniku uzgadniania wartości odpowiednich stwierdzeń ze zdefiniowanych warstw.

3.7.1. Wartości wag warstw sieci przekonań

Wartości wag dla warstw, w których znajdują się opracowane sieci stwierdzeń zostały określone na podstawie analizy wyników uzyskiwanych z tych sieci. Stwierdzono, że nie można jednoznacznie określić, która sieć daje najlepsze wyniki, np. do orzekania o stanie technicznym pompy najlepsza była sieć z warstwy 2. (dotyczącej działania wybranych elementów obiektu), ale w odniesieniu do kanału pomiędzy zbiornikami najlepsze wyniki otrzymywano najczęściej z sieci ulokowanej w warstwie 3. (dotyczącej harmonogramu działania obiektu).

Wobec powyższego sieć z warstwy 3 musi mieć największą wagę, ponieważ umożliwia wyłącznie diagnozę stanu technicznego kanału pomiędzy zbiornikami (rys. 7). Waga sieci z warstwy 2 została określona procentowo w odniesieniu do wagi sieci z warstwy 3 jako stosunek odpowiednich wartości oczekiwanych dotyczących trafności diagnozy. Podobnie określono wagę sieci z warstwy 1 w odniesieniu do wagi sieci z warstwy 2. Ostatecznie uzyskano następujące wartości wag kolejnych warstw: 0,62; 0,83; 1. Szczegółowy opis identyfikacji tych wartości znajduje się w [4].

3.7.2. Uzgadnianie rozwiązań sieci przybliżonej

Wyznaczenie rozwiązania dla przybliżonej sieci stwierdzeń realizowane jest w wyniku złożenia w jedną sieć przybliżonych sieci stwierdzeń z wszystkich zidentyfikowanych warstw sieci wielomodalnej. Sprowadza się to do rozwiązania układu nierówności obejmującego wszystkie relacje typu (3) występujące w sieci przybliżonej z uwzględnieniem każdej zidentyfikowanej warstwy.

Jeżeli w przybliżonej sieci stwierdzeń w warstwie zerowej nie zostanie wykryta sprzeczność (tzn. $\forall i,j: \delta_{ij} = 0$), to nierówności wchodzące w skład układu będą miały postać (2). Wówczas rozwiązanie układu nierówności jest równoważne koniunkcji rozwiązań uzyskiwanych z modeli reprezentowanych w postaci sieci stwierdzeń z każdej zidentyfikowanej warstwy.

Koniunkcja stwierdzeń s_i i s_j , które przyjmują wartości $b(s_i) \in [b_{\min}(s_i); b_{\max}(s_i)]$ oraz $b(s_j) \in [b_{\min}(s_j); b_{\max}(s_j)]$, definiowana jest w następujący sposób:

$$b(s_i \wedge s_j) \in [\min(b_{\min}(s_i), b_{\min}(s_j)); \min(b_{\max}(s_i), b_{\max}(s_j))] \quad (5)$$

3.8. Przykłady wyników uzyskiwanych z rozpatrywanych sieci wielomodalnych

W tab. 2, 3 i 4 przedstawiono wybrane wyniki diagnozowania stanu technicznego badanego obiektu za pomocą opracowanych wielomodalnych sieci stwierdzeń.

Tab. 2. Uzyskane wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia *Pompa działa prawidłowo* wtedy, gdy stopnie przekonania o prawdziwości stwierdzeń *Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest sprężone do wymaganej wartości* oraz *Wartość natężenia przepływu ma oczekiwany przebieg* były równe 1

Tab. 2. Obtained degrees of belief about truthfulness of the statement *The pump works correctly* when the degrees of belief about truthfulness of the statements *Air pressure in the tank T3 is compressed to demanded value* and *The value of flow intensity has got expected course* were equal to 1

SIECI PRZEKONAŃ				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	1	0,99	-	0,99
PRZYBLIŻONA SIEĆ STWIERDZEŃ				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	1	1	-	1
WARTOŚĆ WZORCOWA				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	1	1	-	1

Tab. 3. Uzyskane wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia, *Pompa działa prawidłowo* wtedy, gdy stopnie przekonania o prawdziwości stwierdzeń *Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest sprężone do wymaganej wartości* oraz *Wartość natężenia przepływu ma oczekiwany przebieg* zawarte były odpowiednio w przedziałach [0,7; 0,9] i [0,85; 0,95]

Tab. 3. Obtained degrees of belief about truthfulness of the statement *The pump works correctly* when the degrees of belief about truthfulness of the statements *Air pressure in the tank T3 is compressed to demanded value* and *The value of flow intensity has got expected course* were contained in the intervals [0,7; 0,9] and [0,85; 0,95] respectively

PRZYBLIŻONA SIEĆ STWIERDZEŃ				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	[0,7; 1]	[0,85; 1]	-	[0,7; 1]
WARTOŚĆ WZORCOWA				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	1	1	-	1

Tab. 4. Uzyskane wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia, *Kanal pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest drożny* wtedy, gdy stopień przekonania o prawdziwości stwierdzenia *Czas zwiększania ciśnienia w zbiorniku T3 jest dopuszczalny* wynosił 1 a dla stwierdzenia *Wartość natężenia przepływu ma oczekiwany przebieg* zawarty był w przedziale [0,85; 0,95]

Tab. 4. Obtained degrees of belief about truthfulness of the statement *The canal between the tanks T1 and T3 is pervious* when the degree of belief about truthfulness of the statement *Time of increasing pressure in the tank T3 is acceptable* was equal to 1 and for the statement *The value of flow intensity has got expected course* was contained in the interval [0,85; 0,95]

PRZYBLIŻONA SIEĆ STWIERDZEŃ				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	-	[0,85; 1]	1	[0,85; 1]
WARTOŚĆ WZORCOWA				
WARSTWA	W1	W2	W3	W0
STOPIEŃ PRZEKONANIA	-	1	1	1

W odniesieniu do przybliżonych sieci stwierdzeń rozpatrywano sytuacje, gdy znane były dokładne (tab. 2), przybliżone (tab. 3) lub dokładne i przybliżone (tab. 4) wartości wybranych stwierdzeń. Symbole W1, W2, W3 i W0 to identyfikatory warstw.

3.9. Zalety i wady rozpatrywanych sieci

Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest wskazanie najważniejszych zalet i wad rozpatrywanych sieci stwierdzeń. Przedstawiono je w tab. 5.

Tab. 5. Zalety i wady sieci przekonań oraz przybliżonych sieci stwierdzeń
Tab. 5. Advantages and disadvantages of belief networks and statement approximate networks

SIEĆ PRZEKONĄŃ	
ZALETY	WADY
<ul style="list-style-type: none"> przejrzysta reprezentacja wiedzy o zależnościach pomiędzy stwierdzeniami (niekoniecznie o charakterze przyczynowo-skutkowym) oszczędna reprezentacja łącznego rozkładu prawdopodobieństwa, wydajne algorytmy wnioskowania, możliwość automatycznej identyfikacji zarówno struktury jak i parametrów sieci, wysoka skuteczność działania potwierdzona w wielu praktycznych zastosowaniach (nie tylko w diagnostyce technicznej), dostępność wielu aplikacji umożliwiających budowanie tego typu sieci. 	<ul style="list-style-type: none"> w ogólnym wypadku trudna identyfikacja tablic prawdopodobieństw warunkowych oraz prawdopodobieństw a priori, zwiększanie rozmiaru sieci powoduje eksponencyjny wzrost liczby jej parametrów, w odniesieniu do sieci o skomplikowanej strukturze utrudniona identyfikacja warunkowej niezależności węzłów sieci, poprawna agregacja wyników otrzymywanych z różnych sieci jest zazwyczaj zadaniem trudnym, brak skutecznych metod pozwalających składać sieci z niezależnie opracowanych podsieci.
PRZYBLIŻONA SIEĆ STWIERDZEŃ	
<ul style="list-style-type: none"> przejrzysta reprezentacja wiedzy o zależnościach pomiędzy stwierdzeniami, proste algorytmy wnioskowania, relatywnie niewielka liczba parametrów koniecznych do identyfikacji, możliwość wnioskowania dla danych przybliżonych a nawet sprzecznych (przypadki często występujące w praktyce), możliwość wyznaczenia stopnia sprzeczności stwierdzeń w sieci, ułatwiona identyfikacja warunkowej niezależności węzłów sieci, możliwość agregacji i/lub uzgadniania wyników otrzymywanych z różnych sieci. 	<ul style="list-style-type: none"> identyfikacja struktur sieci wymaga dużej staranności a w szczególnych wypadkach może być bardzo trudna, dla danych sprzecznych czas obliczeń ulega wydłużeniu, a przyjęcie nieliniowej funkcji celu w ogólnym wypadku nie gwarantuje znalezienia minimum globalnego.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań porównawczych wielomodalnych sieci stwierdzeń wynika, że modele diagnostyczne reprezentowane w tej postaci pozwalają trafnie określać stan techniczny danego obiektu w odniesieniu do stanów prostych a także dla niektórych stanów złożonych. Wraz ze wzrostem liczby niesprawnych elementów obiektu trafność diagnozy maleje. Obecnie nie jest znana ogólna metoda, która umożliwiałaby rozróżnianie takich stanów.

Stosowanie modeli reprezentowanych w postaci sieci przekonań znalazło uznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym także diagnostyce technicznej, o czym świadczy liczny zbiór publikacji na ten temat. Ciekawą alternatywą lub uzupełnieniem wydają się być sieci stwierdzeń reprezentowane w postaci przybliżonych warunków koniecznych i dostatecznych. Posiadają one wiele zalet a w szczególności możliwość wnioskowania na podstawie danych nieprecyzyjnych i do pewnego stopnia sprzecznych. Można przypuszczać, że powinno uwidocznić się to zwłaszcza w odniesieniu do złożonych obiektów technicznych.

W przekonaniu autorów wielomodalne sieci stwierdzeń, definiowane w sposób przedstawiony w niniejszym artykule, mogą stanowić podstawę do opracowywania nowych procedur związanych z projektowaniem systemów nadzoru maszyn lub poprawę (uproszczenie) procedur już istniejących.

Opisano fragment wyników badań finansowanych częściowo ze środków na naukę jako badania statutowe i projekty badawcze 4T07B04230 pt. „Wieloaspektowe modele diagnostyczne” oraz N504478434 pt. „Budowa diagnostycznych systemów doradczych z zastosowaniem wieloskalowych sieci stwierdzeń”.

5. Literatura

- [1] Sioson A. A.: Multimodal networks in biology. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2005.
- [2] Heath L. S., Sioson A. A.: Semantics of multimodal networks. *IEEE/ACM Trans. on Computational Biology and Bioinformatics* 6(2): 271–280, 2009.
- [3] Heath L. S., Sioson A. A.: Multimodal networks: Structure and operations. *IEEE/ACM Trans. on Computational Biology and Bioinformatics* 6(2): 321–332, 2009.
- [4] Cholewa W.: Szkieletowy system doradczy MMNET. Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, wol. 143 serii Zeszyty, Gliwice, 2010 (zeszyt dostępny na stronie <http://www.kpkm.polsl.pl> w dziale Publikacje).
- [5] Cholewa W.: Multimodal statement networks for diagnostic applications. In: P. Sas and B. Bergen (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering ISMA 2010*, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, pp. 817–830.
- [6] Beliakov G., Pradera A., Calco T.: *Aggregation Functions: A Guide for Practitioners*. Springer Verlag, Heidelberg, 2007.
- [7] Cholewa W.: Aggregation of fuzzy opinions — an axiomatic approach. *Fuzzy Sets and Systems* 17: 249–258, 1985.
- [8] Jensen F. V., Nielsen T. D.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, New York, 2007.
- [9] Skupnik D.: Wieloaspektowe modele diagnostyczne. Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, wol. 140 serii Zeszyty, Gliwice, 2009 (zeszyt dostępny na stronie <http://www.kpkm.polsl.pl> w dziale Publikacje).
- [10] Skupnik D.: Zastosowanie języka UML do konstruowania wieloaspektowych modeli diagnostycznych. *MOTROL, Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa* 11c: 182–190, 2009.
- [11] Pearl J., Geiger D., Verna, T.: Conditional independence and its representation, *Kybernetika* 25: 33–44, 1989.

otrzymano / received: 03.07.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011

artykuł recenzowany