

Wojciech ZOLEŃSKI  
Politechnika Śląska  
Wydział Organizacji i Zarządzania  
Instytut Zarządzania i Administracji

## KONCEPCJA SYSTEMU EKSPERTOWEGO WSPOMAGAJĄCEGO POZYSKIWANIE WIEDZY

**Streszczenie.** W pierwszej części artykułu przedstawiono główne idee systemów ekspertowych. Następnie zaproponowano ogólną koncepcję systemu ekspertowego wspomagającego pozyskiwanie wiedzy faktograficznej. Ponadto, w artykule przedstawiono dwie metody optymalizacji procesu wnioskowania w regułowym systemie ekspertowym.

## THE CONCEPT OF EXPERT SYSTEM SUPPORTING THE KNOWLEDGE ACQUISITION

**Summary.** The first part of the article presents the main ideas of expert systems. Then the author proposes the general concept of the supporting factual knowledge acquisition, which make use of the expert system. Additionally, the article presents, how to optimize the inference process in the rule expert system.

### 1. Wstęp

W bazie wiedzy systemu ekspertowego wiedza występuje w postaci stwierdzeń i reguł. Stwierdzenie to zdanie oznajmujące proste, któremu można przypisać prawdziwość (wartość logiczną, czyli w logice dwuwartościowej prawdę lub fałsz) oraz pewność. W wielu przypadkach miarą pewności może być prawdopodobieństwo, że stwierdzenie jest prawdziwe. Fakt to stwierdzenie, któremu przypisano prawdziwość i pewność. Fakt to najprostszy element wiedzy faktograficznej. Zależności logiczne pomiędzy stwierdzeniami (czyli „wiedzę nomologiczną”) reprezentują w systemie ekspertowym reguły. Reguły to implikacje ekspertowe. Poprzednik implikacji najczęściej zawiera koniunkcję stwierdzeń w postaci

prostej i (lub) zanegowanej, a następnik implikacji jest pojedynczym stwierdzeniem (wnioskiem). W systemie ekspertowym występują dwa rodzaje stwierdzeń: warunki dopytywalne, czyli wejścia systemu wnioskującego oraz wnioski, czyli wyjścia systemu wnioskującego. Pozyskiwanie wiedzy faktograficznej to ustalanie prawdziwości i pewności warunków dopytywalnych. W systemach ekspertowych celem pozyskiwania wiedzy faktograficznej jest wnioskowanie, czyli wyznaczanie na podstawie faktów i reguł prawdziwości i pewności wniosków (konkluzji).

Działanie systemu ekspertowego jest uproszczonym odwzorowaniem prawie każdego procesu pozyskiwania wiedzy faktograficznej. Istnieją dwa przeciwstawne podejścia w pozyskiwaniu wiedzy i wypracowaniu konkluzji (np. w celu dokonania oceny, postawienia diagnozy, wypracowania decyzji):

1. Pozyskiwanie wiedzy i jej przetwarzanie (wnioskowanie) realizowane jest w dwóch etapach. W pierwszym ustala się wszystkie fakty, które potencjalnie mają wpływ na sformułowanie konkluzji, a w drugim etapie przetwarza się informacje (przeprowadza wnioskowanie) i wypracowuje wszystkie wynikające stąd konkluzje. W systemach ekspertowych odpowiada to wnioskowaniu w przód. W podejściu takim często okazuje się, że część informacji pozyskano niepotrzebnie, gdyż inne fakty były warunkiem wystarczającym dla sformułowania konkluzji.
2. Pozyskiwanie wiedzy o pojedynczych faktach i wnioskowanie w celu wypracowania konkluzji realizowane są naprzemiennie. Proces pozyskiwania informacji kończy się, gdy zostaną ustalone fakty wystarczające dla sformułowania konkluzji. W systemach ekspertowych odpowiada to wnioskowaniu wstecz.

Pozyskiwanie wiedzy faktograficznej wiąże się z pewnymi nakładami (koszty, czas pozyskiwania informacji). Nakłady, jakie trzeba ponieść na poznanie faktów są zróżnicowane. Zróżnicowane jest też prawdopodobieństwo, że dany fakt będzie miał duży wpływ na wypracowanie konkluzji. Dlatego kolejność, w jakiej ustalana jest prawdziwość i pewność warunków dopytywalnych ma duży wpływ na łączne nakłady poniesione na pozyskanie potrzebnej wiedzy. W dalszej części artykułu opisano procedury optymalizujące proces pozyskiwania wiedzy.

## **2. Główne idee systemów ekspertowych**

Systemy ekspertowe (SE) są narzędziami sztucznej inteligencji, które najwcześniej znalazły zastosowanie praktyczne. Prace nad SE dały początek nowej dziedzinie sztucznej inteligencji – inżynierii wiedzy.

Programy konwencjonalne (proceduralne) utworzone są z algorytmów i struktur danych. Natomiast najważniejszymi składnikami systemów opartych na wiedzy są baza wiedzy specyficznej dla problemu oraz uniwersalny system wnioskujący<sup>1</sup>. Rozwiązanie takie ma swoje zalety i wady. Zaimplementowanie w systemie wiedzy o problemie jest łatwiejsze, ale efektywność rozwiązywania problemów jest mniejsza. W praktyce uniwersalne systemy wnioskujące są skuteczne, jeżeli problem opisany jest przede wszystkim zależnościami logicznymi. Ograniczenia te w znacznej mierze wynikają stąd, że systemy oparte na wiedzy nie osiągnęły jeszcze takiego stopnia dojrzałości, jak programy proceduralne.

Na początku lat dziewięćdziesiątych pojawiła się koncepcja systemów ekspertowych drugiej generacji. Systemy te łączą eksperymentalną wiedzę płytką (opisaną zwłaszcza zależnościami logicznymi) z teoretyczną wiedzą głęboką (opisaną przede wszystkim modelami matematycznymi).

W literaturze przedmiotu wymienia się różne właściwości systemów ekspertowych uważając je za najbardziej istotne i będące podstawą odróżnienia ich od innych systemów informatycznych:

- System ekspertowy jest to program komputerowy przeznaczony do rozwiązywania specjalistycznych problemów, które wymagają profesjonalnej ekspertyzy.
- System ekspertowy jest to program komputerowy używający wiedzy i procedur wnioskowania do rozwiązywania problemów o skali trudności na poziomie profesjonalisty w danej, specyficznej dziedzinie.
- System oparty na wiedzy, w którym wiedza i procedury wnioskowania są modelowane na wzór ekspertów, nazywa się systemem ekspertowym. Systemami działającymi na podstawie wiedzy nazywa się systemy, w których baza wiedzy wydzielona jest od systemu wnioskującego i pozostałych modułów programu<sup>2</sup>.
- Podstawową cechą systemu ekspertowego jest oddzielenie bazy wiedzy (a więc części programu opisującej wiedzę dziedzinową, związaną z rozwiązywanym problemem) i systemu wnioskującego (a więc części programu rozwiązującej problem).

Określenie systemów ekspertowych jako programów komputerowych do rozwiązywania (lub wspomagających rozwiązywanie) problemów wymagających profesjonalnej ekspertyzy jest definicją najbardziej ogólną, obejmującą szeroką klasę programów, nieraz bardzo różniących się między sobą. Może to prowadzić do nieporozumień. Systemom ekspertowym przypisuje się różne właściwości, nieraz ze sobą sprzeczne, które odnoszą się nie do wszystkich, lecz do konkretnych systemów.

---

<sup>1</sup> Niederliński A.: Regułowe systemy ekspertowe. Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2000.

<sup>2</sup> Sroka H.: Systemy ekspertowe. Komputerowe wspomaganie decyzji w zarządzaniu i finansach. Akademia Ekonomiczna, Katowice 1994.

W systemach ekspertowych znajdują zastosowanie pewne, typowe rozwiązania, które jednak nie muszą występować w każdym systemie.

1. Najbardziej charakterystyczną cechą SE jest rozdzielenie bazy wiedzy specyficznej dla rozwiązywanego problemu od uniwersalnego systemu wnioskującego i innych modułów systemu. Rozwiązanie takie zdecydowanie dominuje we współczesnych systemach, chociaż istnieją też SE, w których wiedza jest zanurzona (ukryta) w kodzie programu.
2. Systemy ekspertowe zawierają wiedzę pozyskaną od ekspertów. Chociaż prowadzone są prace badawcze nad automatycznym pozyskiwaniem wiedzy (np. wnioskowanie indukcyjne, wnioskowanie na podstawie przypadków), podstawowym źródłem wiedzy są eksperci dziedzinowi.
3. Bazy wiedzy i system wnioskujący opierają się przede wszystkim na modelach logicznych. Bardzo często wiedza w SE ma postać reguł:

**jeżeli warunek to wniosek.**

Regułowe SE stanowią ponad 80% użytkowanych obecnie systemów<sup>3</sup>.

4. Wiedza w bazach wiedzy może występować w postaci deklaratywnej. Nie jest konieczne sformułowanie problemu w postaci proceduralnej (algorytmicznej).
5. System ekspertowy w procesie wnioskowania może prowadzić z użytkownikiem dialog, informując go o częściowych wynikach wnioskowania oraz o możliwościach i ograniczeniach dokonania ekspertyzy. SE może też na bieżąco żądać dostarczenia niektórych danych – tylko tych, które są potrzebne na danym etapie ekspertyzy. Dialog z użytkownikiem jest charakterystyczny dla wnioskowania wstecz.
6. Wynik wnioskowania oraz wykonywane przez SE działania (np. zadawane użytkownikowi pytania) mogą być uzasadniane. Właściwość ta wynika m.in. stąd, że wiedza występuje w jawnej, ujednocionej postaci, a system wnioskujący oparty jest zazwyczaj na kilku uniwersalnych prawach logicznych.

Z rozwiązań tych wynikają m.in. następujące zalety systemów ekspertowych:

1. Dzięki rozdzieleniu systemu wnioskującego i bazy wiedzy uzyskuje się następujące efekty:
  - Tworzenie systemu informatycznego, a zwłaszcza modyfikacja i konserwacja mogą być prostsze i tańsze<sup>4</sup>.
  - Wiedza dziedzinowa, zapisana w języku zbliżonym do naturalnego, występuje w postaci jawnej i jest w naturalny sposób uporządkowana i ustrukturyzowana.

---

<sup>3</sup> Mulawka J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997.

<sup>4</sup> Zieliński J.: Inteligentne systemy w zarządzaniu. PWN, Warszawa 2000.

- Istnieje możliwość tworzenia, rozbudowy i modyfikacji bazy wiedzy przez użytkownika. Zmiany w bazie wiedzy nie naruszają integralności systemu wnioskującego, dlatego nie jest konieczna pomoc informatyka.
  - Bazę wiedzy można rozwijać etapami (inkrementalnie), dodając nowe elementy do już istniejących. Wiedza często występuje w postaci wielopoziomowo zagnieżdżonych zasad i wyjątków (czyli np. reguł). Prosta baza wiedzy opisuje sytuacje typowe, dodanie nowych reguł może uwzględniać wyjątki i nowe zasady, zwiększając dokładność i rozszerzając zakres stosowalności SE.
  - Istnieje możliwość tworzenia systemów szkieletowych (*shell*), czyli SE bez baz wiedzy. Systemy szkieletowe są w zasadzie językami programowania wysokiego poziomu.
  - Wykorzystanie SE jest odpowiednim rozwiązaniem, gdy wiedza, jaka powinna znajdować się w systemie, jest poufna i nie należy jej ujawniać zewnętrznemu wykonawcy. Utworzenie bazy wiedzy jest znacznie łatwiejsze od zbudowania kompletnego systemu informatycznego i mogą to zrobić sami użytkownicy wspomagani przez wewnętrzne służby inżynierii wiedzy.
2. Wiedza ekspertów, będąca cennym dobrem, podlega zapominaniu i rozpraszaniu<sup>5</sup>. Pozyskanie tej wiedzy i zapisanie w bazie wiedzy SE umożliwia jej utrwalenie, poprawienie, uporządkowanie i ustrukturyzowanie, a także zintegrowanie z wiedzą innych ekspertów. Zapisaną wiedzę można powielać i wykorzystywać wielokrotnie w różnych miejscach. W porównaniu z ekspertem, SE mogą działać szybciej i pewniej, dostarczając ekspertyzy tańszej i powtarzalnej. Popełniane przez ekspertów przypadkowe błędy, będące wynikiem przeoczenia lub nieuwagi, w SE nie występują. Ewentualne błędy obsługi w wielu wypadkach mogą być rozpoznane i poprawione.
  3. Cechą charakterystyczną SE jest korzystanie z wiedzy przedstawionej za pomocą modeli logicznych. Jeżeli rzeczywistą sytuację opisują zmienne liczbowe, to często przekształca się je na zmienne logiczne. Przykładowo, zamiast dokładnej wartości wyniku finansowego przedsiębiorstwa (zmienna liczbowa) w pewnych przypadkach wystarczy informacja, czy wynik finansowy jest dodatni (zmienna logiczna). Opis problemu jest wprawdzie mniej dokładny, ale znacznie prostszy. W szczególności nieskończona przestrzeń zmiennych liczbowych ciągłych zastąpiona jest skończoną przestrzenią zmiennych logicznych. Jednak w niektórych przypadkach rozmiary tej przestrzeni mogą być bardzo duże ze względu na eksplozję kombinatoryczną. Rozszerzeniem wnioskowania w logice dwuwartościowej jest **wnioskowanie przybliżone**. Stwierdzenie może mieć wtedy przybliżoną prawdziwość lub przybliżoną

---

<sup>5</sup> Jashapara A.: Zarządzanie wiedzą. PWE, Warszawa 2006.

pewność. W wielu przypadkach zapewnia to lepsze odwzorowanie intuicyjnej wiedzy eksperta, lepszy opis modelu problemu i dostępnych danych<sup>6</sup>. Wnioskowanie przybliżone łączy niektóre zalety modeli logicznych i modeli ciągłych, np. umożliwia stosowanie metod gradientowych w przeszukiwaniu przestrzeni rozwiązań. Wadą wnioskowania przybliżonego jest większa złożoność wiedzy i systemu wnioskującego. Korzystanie z modeli logicznych, dokładnych lub przybliżonych ma następujące zalety:

- Zmienne ilościowe można interpretować jakościowo. Interpretacja taka ukazuje najistotniejsze cechy opisywanego zjawiska, ułatwia też klasyfikację i selekcję danych.
  - Z dużej liczby danych można wybrać tylko dane istotne dla opisu zjawiska. Opis problemu staje się przez to prostszy, bardziej przejrzysty i czytelny.
  - W niektórych przypadkach dopuszczalne jest korzystanie z wiedzy i danych, które są niedokładne, niepewne lub niekompletne.
  - System ekspertowy może korzystać z wiedzy słabo ustrukturyzowanej, dla której nie istnieją dokładne (analityczne) modele matematyczne. Za pomocą odpowiednio dużej liczby zależności logicznych (np. reguł) daje się opisać nawet bardzo złożony problem odwzorowujący intuicyjną (doświadczalną) wiedzę ekspertów. Faktycznie model taki stanowi złożenie bardzo wielu elementarnych modeli cząstkowych.
  - Przestrzeń rozwiązań w problemach opisanych modelami logicznymi jest skończona. Dlatego w prostych wypadkach możliwe jest zbadanie całej przestrzeni. Gdy rozmiary przestrzeni są duże, wówczas stosuje się odpowiednie algorytmy przeszukiwania – ślepe i heurystyczne. W szczególności przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań stosuje się wtedy, gdy wiedza SE ma postać deklaratywną. Przeszukiwanie przestrzeni to uniwersalna metoda rozwiązywania problemów logicznych. W przypadku małych przestrzeni jest to metoda dokładna i niezawodna.
4. Systemy ekspertowe mogą korzystać z wiedzy w postaci deklaratywnej<sup>7</sup>. Deklaratywna reprezentacja wiedzy jest łatwiejsza w opisie i formalizacji. Tworząc deklaratywny model problemu, nie trzeba określać, jak znaleźć rozwiązanie. Wiedza deklaratywna jest też bardziej ogólna.
- Należy zaznaczyć, że posługiwanie się wiedzą deklaratywną wymaga pewnego doświadczenia. Początkujący użytkownicy powinni zachować dużą ostrożność

<sup>6</sup> Cholewa W., Pedrycz W.: Systemy doradcze. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.

<sup>7</sup> Kisielnicki J., Sroka H.: Systemy informacyjne biznesu. Placet, Warszawa 2005.

i korzystać raczej z takich modeli i zadań, które nie prowadzą do eksplozji kombinatorycznej i nie mogą spowodować zapętlenia się systemu wnioskującego. Przed taką sytuacją zabezpiecza na przykład zastosowanie reguł z warunkami i wnioskami w postaci zdań logicznych (a nie zdaniowych funkcji logicznych). Uniwersalne metody przeszukiwań są bowiem mało efektywne w przypadku dużych przestrzeni rozwiązań. Ponadto, jeżeli nie zostaną uwzględnione specyficzne cechy zastosowanej w SE metody poszukiwań, to system wnioskujący – nawet w prostych i poprawnie sformułowanych zadaniach – może się zawiesić, wchodząc w niekończącą się pętlę.

5. Systemy ekspertowe integrują wiedzę ekspertów z możliwościami systemów informatycznych. Nową jakość działania daje się osiągnąć dzięki skojarzeniu intuicyjnej wiedzy człowieka z możliwościami systemów informatycznych, takimi jak: szybkość działania, dostęp do dużych zbiorów danych, obliczenia numeryczne i rozwiązywanie problemów logicznych. Efektywność działania można też znacznie zwiększyć przez wykorzystanie urządzeń wejścia-wyjścia w celu automatycznego wprowadzania danych i wyprowadzania wyników (np. w systemach czasu rzeczywistego).
6. Systemy ekspertowe wprowadzają pewną dyscyplinę, stałość i przejrzystość procedur postępowania, umożliwiają czytelne ich dokumentowanie.
7. Wiedza, będąca jednym z najcenniejszych zasobów przedsiębiorstwa, może zostać utrwalona, a następnie może być uzupełniana i doskonalona.
8. Systemy ekspertowe pełnią ważną rolę edukacyjną, pomagają szkolić nowych pracowników, zmniejszając koszty szkolenia. Dzięki wdrażaniu SE lepiej wykorzystuje się umiejętności pracowników. Szczególne znaczenie może mieć wykształcenie własnych służb inżynierii wiedzy. Stosowanie SE ułatwia też zdobywanie doświadczeń zaawansowanym użytkownikom systemów informatycznych.
9. Małe systemy ekspertowe mogą wypełnić lukę pomiędzy najczęściej stosowanymi w zarządzaniu systemami obsługi baz danych i systemami zautomatyzowanego biura.

W stosowaniu systemów ekspertowych występuje też wiele trudności i problemów. Wiele wad SE wynika stąd, że systemy wykorzystujące wiedzę nie osiągnęły jeszcze takiego stadium rozwoju, jak programy proceduralne. Niektóre wady wynikają jednak z samego paradygmatu programowania zastosowanego w SE.

1. Systemy ekspertowe wykazują kompetencję tylko w wąskiej dziedzinie. Jeżeli problem wykracza poza granice tego, co zawarte jest w bazie wiedzy, to jakość ekspertyzy gwałtownie spada. SE nie zawsze informuje o przekroczeniu granic kompetencji.
2. Systemy ekspertowe wykorzystują wiedzę płytką, leżącą blisko powierzchni zjawisk, a nie wiedzę głęboką, wyjaśniającą przyczyny tych zjawisk.

3. Brak jest rozwiniętych, ustalonych standardów zapisu wiedzy – stąd problemy z przenoszeniem wiedzy pomiędzy systemami.
4. Istnieje zasadnicza różnica pomiędzy procesem myślenia człowieka a przetwarzaniem informacji przez SE. Powszechnie dostępna wiedza nie występuje w takiej postaci, jaka jest wymagana w SE.
5. Wiedza w SE pochodzi od ekspertów, a więc ma charakter wtórny. Na ogół nie odwzorowuje ona w pełni doświadczenia ekspertów i jest mniej aktualna.
6. Zastosowanie przyjętych schematów reprezentacji wiedzy pociąga za sobą konieczne uproszczenia. Wiedza w SE najczęściej występuje w postaci zależności logicznych. Wymóg przedstawienia wiedzy w ujednocionej postaci powoduje małą elastyczność zapisu. Jeżeli istnieje prosty model matematyczny problemu (np. liniowy), to przekształcenie go na zbiór zależności logicznych jest nienaturalne i mało efektywne.
7. Przedstawienie wiedzy w postaci deklaratywnej, a także ogólna postać zapisu wiedzy powodują trudności w stabilnym i efektywnym działaniu systemu wnioskującego. Specjalizowane programy algorytmiczne działają pewniej i sprawniej niż uniwersalny system wnioskujący.
8. Określenie jakości działania SE jest trudne. Nie zostały jeszcze wypracowane odpowiednie metody badania poprawności ekspertyzy.
9. Jawny zapis wiedzy w SE utrudnia zachowanie jej poufności.
10. Brakuje rozwiązań prawnych regulujących odpowiedzialność za działanie SE, zachowanie tajemnicy wiedzy zawartej w systemie oraz ochronę praw autorskich osób, których wiedzę zapisano w bazie wiedzy.
11. Kluczowym problemem w tworzeniu SE jest pozyskanie wiedzy ekspertów w danej dziedzinie. Nie można tego efektywnie wykonać bez uczestnictwa inżynierów wiedzy<sup>8</sup>. Małe rozpowszechnienie SE sprawia, że występuje deficyt specjalistów w zakresie inżynierii wiedzy, posiadających odpowiednie doświadczenie praktyczne.
12. Trudnym problemem jest znalezienie właściwego zastosowania SE. Aby wdrożenie było opłacalne, zadanie, dla którego budowany jest SE, musi spełniać pewne wymagania. Większość problemów, występujących w praktyce, nie spełnia tych wymagań. Można jednak oczekiwać, że postęp technologii, obniżenie kosztów i kumulowanie się doświadczeń spowodują stałe powiększanie obszaru zastosowań, w których wykorzystanie SE będzie efektywne. Analogiczna sytuacja występowała w początkowym okresie komputeryzacji.

---

<sup>8</sup> Sterman J.D.: Expert Knowledge Elicitation to Improve Mental and Formal Models. Working Paper, No. 4686, MIT, Cambridge 1997.



### 3. Optymalizacja procesu pozyskiwania wiedzy faktograficznej

#### 3.1. Sformułowanie problemu

1. W bazach wiedzy systemu ekspertowego dany jest zbiór zależności (reguł) przedstawiających zależności pomiędzy warunkami dopytywalnymi a badanym wnioskiem.
2. Dane są wartości nakładów (np. koszt, czas pozyskiwania wiedzy) koniecznych do ustalenia prawdziwości warunków dopytywalnych mających potencjalnie wpływ na weryfikację (falsyfikację) badanego wniosku.
3. Znane są szacunkowe prawdopodobieństwa tego, że warunek okaże się prawdziwy. Jeżeli nie ma żadnych przesłanek dla oszacowania prawdopodobieństwa prawdziwości warunku dopytywalnego, należy przyjąć, że wartość ta jest równa  $\frac{1}{2}$ .
4. Celem procedury optymalizacyjnej jest wyznaczenie takiej kolejności zapytań o prawdziwość warunków dopytywalnych, aby wartość oczekiwana nakładów poniesionych na weryfikację (falsyfikację) badanego wniosku była minimalna.

#### 3.2. Przykład problemu optymalizacyjnego

W tabeli 1 przedstawiono fragment bazy wiedzy systemu ekspertowego wspomagającego diagnostykę pewnego systemu technicznego. W tabeli podane są też koszty wyznaczenia wartości logicznych warunków dopytywalnych oraz prawdopodobieństwa, że warunki te są prawdziwe. Należy zbadać wartość logiczną wniosku  $w$  (czy wymagana jest wymiana podzespołu  $k$ ) przy minimalnej wartości oczekiwanej kosztu ekspertyzy.

Tabela 1

Dane dla przykładowego problemu optymalizacyjnego

Etykieta	Stwierdzenie	Reguły			
		R1	R2	R3	R4
$a$	W diagnozowanym urządzeniu występuje objaw $a$	t	n		
$b$	W diagnozowanym urządzeniu występuje objaw $b$	n			
$c$	W diagnozowanym urządzeniu występuje objaw $c$		t	T	
$d$	W diagnozowanym urządzeniu występuje objaw $d$			T	t
$k$	Podzespół $k$ jest niesprawny	w	w	w	t
$w$	Podzespół $k$ wymaga wymiany				w
R1: $If (a \wedge \neg b) then k$ ; R2: $If (\neg a \wedge c) then k$ ; R3: $If (c \wedge d) then k$ ; R4: $If (d \wedge k) then w$ ,					
Warunek dopytywalny	Koszt zbadania	Prawdopodobieństwo warunku prawdziwości			
$a$	200	$p(a)=0,2$			
$b$	200	$p(b)=0,4$			
$c$	200	$p(c)=0,3$			
$d$	200	$p(d)=0,1$			

Źródło: opracowanie własne.

### 3.3. Procedura optymalizacji pojedynczego zapytania

Dla optymalizacji pojedynczego zapytania można utworzyć – oparty na tablicy prawdy – kalkulator prawdopodobieństwa, że badany wniosek  $w$  jest prawdziwy (lub fałszywy). Tabela 2 przedstawia taki kalkulator.

Tabela 2

Kalkulator prawdopodobieństwa oparty na tablicy prawdy

Lp.	Warunki i prawdopodobieństwa				wniosek	Cząstkowe prawdopodobieństwa $p(\text{wniosek})$	Cząstkowe prawdopodobieństwa $P(\neg\text{wniosek})$
	a	b	c	d			
	0,2	0,4	0,3	0,1			
1	0	0	0	0	0		$(1-p(a))*(1-p(b))*(1-p(c))*(1-p(d))= 0,3024$
2	0	0	0	1	0		$(1-p(a))*(1-p(b))*(1-p(c))*p(d)= 0,0336$
3	0	0	1	0	0		$(1-p(a))*(1-p(b))*p(c)*(1-p(d))= 0,1296$
4	0	0	1	1	1	$(1-p(a))*(1-p(b))*p(c)*p(d)= 0,0144$	
5	0	1	0	0	0		$(1-p(a))*p(b)*(1-p(c))*(1-p(d))= 0,2016$
6	0	1	0	1	0		$(1-p(a))*p(b)*(1-p(c))*p(d)= 0,0224$
7	0	1	1	0	0		$(1-p(a))*p(b)*p(c)*(1-p(d))= 0,0864$
8	0	1	1	1	1	$(1-p(a))*p(b)*p(c)*p(d)= 0,0096$	
9	1	0	0	0	0		$p(a)*(1-p(b))*(1-p(c))*(1-p(d))= 0,0756$
10	1	0	0	1	1	$p(a)*(1-p(b))*(1-p(c))*$ $(1-p(d))= 0,0084$	
11	1	0	1	0	0		$p(a)*(1-p(b))*p(c)*(1-p(d))= 0,0324$
12	1	0	1	1	1	$p(a)*(1-p(b))*p(c)*p(d)= 0,0036$	
13	1	1	0	0	0		$p(a)*p(b)*(1-p(c))*(1-p(d))= 0,0504$
14	1	1	0	1	0		$p(a)*p(b)*(1-p(c))*p(d)= 0,0056$
15	1	1	1	0	0		$p(a)*p(b)*p(c)*(1-p(d))= 0,0216$
16	1	1	1	1	1	$p(a)*p(b)*p(c)*p(d)= 0,0024$	
						Suma $p(\text{wniosek})= 0,0384$	Suma $p(\neg\text{wniosek})= 0,9616$

Źródło: opracowanie własne.

W celu bieżącej analizy wrażliwości prawdziwości wniosku na zmiany prawdopodobieństw poszczególnych warunków dopytywanych, tablicę taką można zapisać w komórkach arkusza kalkulacyjnego. Możliwe jest utworzenie uniwersalnego arkusza kalkulacyjnego z odpowiednimi formułami. Tablicę prawdy można wtedy wygenerować programowo, na podstawie tablicy reguł Horna (np. przez makro MS Excel). Rozwiązanie takie jest możliwe, gdy badany wniosek zależy od kilku, kilkunastu warunków dopytywalnych (np. dla 10 warunków dopytywalnych tablica zawiera 1024 wiersze). Jeżeli badany wniosek zależy od większej liczby warunków dopytywalnych (np. dla 30 warunków tablica zawiera ponad  $10^9$  wierszy), kalkulacja prawdopodobieństwa może być realizowana tylko programowo.

Wyznaczanie prawdopodobieństwa jest niemonotoniczne. Oznacza to, że wniosek może okazać się fałszywy, nawet jeśli wyznaczenie kolejnych warunków dopytywalnych spowodowało, że prawdopodobieństwo prawdziwości było bardzo duże. Podobnie jest

w przypadku, gdy prawdopodobieństwo prawdziwości wniosku jest bliskie zera, a pomimo to wniosek może okazać się prawdziwy. Jeżeli jednak prawdopodobieństwo prawdziwości jest równe jedności (wniosek prawdziwy i pewny) lub prawdopodobieństwo jest równe zeru (wniosek fałszywy i pewny), to ustalenia takie nie mogą ulec zmianie, niezależnie od tego, jaka jest wartość logiczna niezbadanych jeszcze warunków dopytywalnych.

Niemonotoniczność badania prawdopodobieństwa sprawia, że kalkulator prawdopodobieństwa nie może być zastosowany dla wyznaczenia ściśle optymalnej kolejności ciągu zapytań. W niektórych przypadkach możliwe jest jednak przeprowadzenie ekspertyzy w jednym tylko kroku. Jeśli w przedstawionym przykładzie warunek  $d$  okaże się fałszywy, to prawdopodobieństwo prawdziwości wniosku  $p(w)=0$ , czyli wniosek jest fałszywy, niezależnie od wartości logicznej pozostałych warunków dopytywalnych. Jeżeli jednak warunek  $d$  okaże się prawdziwy, konieczne jest badanie innych warunków (tzn.  $a, b, c$ ).

Uzyskanie całkowitej pewności, że wniosek jest prawdziwy (lub fałszywy) nie zawsze jest uzasadnione. Może to wynikać z nieopłacalności dokładnej ekspertyzy (koszt pozyskania odpowiednich informacji przewyższa ewentualne straty spowodowane niedokładnością ekspertyzy) lub z innych uwarunkowań, np. braku czasu na pozyskanie informacji, jeżeli ekspertyza wykonywana jest w czasie bieżącym (*real time*). Ponadto, w wielu przypadkach praktycznych uzyskanie całkowicie pewnej ekspertyzy jest niemożliwe, gdyż baza wiedzy systemu ekspertowego na ogół nie uwzględnia wszystkich czynników mających wpływ na badany wniosek.

Przedstawiony kalkulator prawdopodobieństwa wnioskowania może też znaleźć inne zastosowania. W szczególności możliwa jest analiza wpływu różnych czynników na pewność działania systemów (w tym systemów technicznych) o złożonej strukturze niezawodnościowej.

### 3.4. Procedura optymalizacji ciągu zapytań

Na potrzeby przedstawionego w punkcie 3.1 problemu optymalizacyjnego opracowano następującą procedurę komputerowych symulacji losowych.

- (1) Powtarzaj podprocedury (2), (3), (4), (5), (6)  $m$  razy, w przykładzie przedstawionym w 3.2  $m=10^5$ .
- (2) Utwórz losowo permutację  $n$  warunków dopytywalnych ( $n$  – liczba warunków dopytywalnych, w przykładzie  $n=4$ , warunkami dopytywalnymi są  $a, b, c, d$ ).
- (3) Dla warunków dopytywalnych, w kolejności ustalonej przez permutację utworzoną w (2), przypisz losowo wartość logiczną (Prawda lub Fałsz), uwzględniając zadanie prawdopodobieństwa (w przykładzie  $p(a), p(b), p(c), p(d)$  podane w tabeli 1).

Po przypisaniu wartości logicznej kolejnemu warunkowi dopytywalnemu wyznacz wartość logiczną badanego wniosku (w przykładzie wniosek  $w$  wyznaczany jest zgodnie z regułami  $R1, R2, R3, R4$ , podanymi w tabeli 1).

Przypisywanie wartości logicznych kolejnym warunkom dopytywalnym zakończ, gdy wniosek  $w$  okaże się prawdziwy lub fałszywy.

- (4) Wyznacz koszt zbadania wartości logicznej wniosku jako sumę kosztów wyznaczenia warunków dopytywalnych (w przykładzie koszt wyznaczenia  $a, b, c, d$  podaje tabela 1).
- (5) Sumuj koszty kolejnych ekspertyz (od 1 do  $m$ ) w rozbiciu na  $n$  pozycji, tzn. koszty ekspertyz zaczynających się od zbadania warunku dopytywalnego 1, 2... $n$  (w przykładzie zaczynających się od zbadania  $a, b, c, d$ ).
- (6) Zliczaj liczbę ekspertyz w rozbiciu na liczbę ekspertyz zaczynających się od zbadania warunku dopytywalnego 1, 2... $n$  (w przykładzie zaczynających się od zbadania  $a, b, c, d$ ).

(koniec pętli zdefiniowanej w instrukcji (1)).

- (7) Wyznacz wartości oczekiwane kosztów ekspertyz w rozbiciu na koszty ekspertyz zaczynających się od warunku dopytywalnego 1, 2... $n$  – jako iloraz sumy kosztów (wyznaczonych w podprocedurze (5)) i liczby ekspertyz (wyznaczonych w podprocedurze (6)).

Uwagi

Ad (1). Liczbę powtórzeń  $m$  można wyznaczyć eksperymentalnie, obserwując rozrzut wyników (np. średniej wartości oczekiwanej kosztów ekspertyzy) przy kilkukrotnym uruchomieniu procedury. Liczbę  $m$  można uznać za wystarczająco dużą, jeżeli rozrzut wyników nie przekroczy pewnej wartości, np. 1%.

Ad (3). Wnioskowanie w logice trójwartościowej (Prawda, Fałsz, Brak wiedzy) jest zawsze monotoniczne, w tym sensie, że jeśli badany wniosek zmienił swoją wartość logiczną ze stanu Brak wiedzy na Prawda lub Fałsz, to wynik ekspertyzy nie może ulec zmianie, niezależnie od wartości logicznych niezbadanych jeszcze warunków dopytywalnych.

Ad (4). Liczba zapytań wystarczających do zakończenia ekspertyzy zależy od kolejności warunków dopytywalnych występujących w permutacji i od wylosowanych wartości logicznych tych warunków. W przedstawionym przykładzie może to być jedno zapytanie (gdy  $d=Fałsz$ ), dwa zapytania (np. gdy  $d=Prawda, c=Prawda$ ), trzy zapytania (np. gdy  $d=Prawda, c=Fałsz, a=Fałsz$ ) lub 4 zapytania (np. gdy  $d=Prawda, c=Fałsz, a=Prawda, b=Fałsz$ ). Wybór warunków dopytywalnych i liczba zapytań mają bezpośredni wpływ na koszt ekspertyzy.

Uruchamiając procedurę symulacji losowych dla przykładu przedstawionego w 3.2 otrzymano następujące wyniki.

Wartość oczekiwana kosztu ekspertyzy w przypadku losowego wyboru kolejności zapytań wynosi 611.

Wartość oczekiwana kosztu ekspertyzy w rozbiciu na ciągi zaczynające się od kolejnych warunków dopytywalnych wynosi odpowiednio:

- 667 dla ciągów zaczynających się od  $a$ ,
- 747 dla ciągów zaczynających się od  $b$ ,
- 586 dla ciągów zaczynających się od  $c$ ,
- 443 dla ciągów zaczynających się od  $d$ .

Ekspertyzę należy więc rozpocząć od zapytania o  $d$ .

Jeżeli  $d=Falsz$ , to wniosek  $w=Falsz$  i ekspertyza zostaje zakończona, a koszt ekspertyzy wynosi 400.

Jeżeli  $d=Prawda$ , to wartość logiczna wniosku nie jest znana ( $w=Brak\ wiedzy$ ) i ekspertyzę należy kontynuować.

Uruchamiając ponownie procedurę symulacyjną (przy ustaleniu, że  $d=Prawda$ ) otrzymano następujące wartości oczekiwane kosztów ekspertyzy:

- 469 dla ciągów zaczynających się od  $a$ ,
- 534 dla ciągów zaczynających się od  $b$ ,
- 344 dla ciągów zaczynających się od  $c$ .

Dalszą część ekspertyzy należy więc rozpocząć od zapytania o  $c$ .

Jeżeli  $c=Prawda$ , to wniosek  $w=Prawda$  i ekspertyza zostaje zakończona, a koszt ekspertyzy wynosi  $400+100=500$ .

Jeżeli  $c=Falsz$ , to wartość logiczna wniosku nie jest znana ( $w=Brak\ wiedzy$ ) i ekspertyzę należy kontynuować.

Uruchamiając ponownie procedurę symulacyjną (przy ustaleniu, że  $d=Prawda$ ,  $c=Falsz$ ) otrzymano następujące wartości oczekiwane kosztów ekspertyzy:

- 259 dla ciągów zaczynających się od  $a$ ,
- 419 dla ciągów zaczynających się od  $b$ .

W dalszej części ekspertyzy należy więc zapytać o  $a$ .

Jeżeli  $a=Falsz$ , to wniosek  $w=Falsz$  i ekspertyza zostaje zakończona, a koszt ekspertyzy wynosi  $400+100+200=700$ .

Jeżeli  $a=Prawda$ , konieczne jest zbadanie wartości logicznej warunku  $b$ .

Jeżeli  $b=Falsz$ , to wniosek  $w=Prawda$ .

Jeżeli  $b=Prawda$ , to wniosek  $w=Falsz$ .

Ekspertyza zostaje zakończona, a koszt ekspertyzy wynosi  $400+100+200+300=1100$ .

**Analityczne sprawdzenie wyników**

$$1) d=\text{Falsz} \quad 1-p(d)=0,9 \quad \text{koszt}=400$$

$$2) d=\text{Prawda} \quad c=\text{Prawda} \quad p(d) \cdot p(c)=0,1 \cdot 0,3=0,03 \quad \text{koszt}=400+100=500$$

$$3) d=\text{Prawda} \quad c=\text{Falsz} \quad a=\text{Falsz} \quad p(d) \cdot (1-p(c)) \cdot (1-p(a))=0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,8=0,056$$

$$\text{koszt}=400+100+200=700$$

$$4) d=\text{Prawda} \quad c=\text{Falsz} \quad a=\text{Prawda} \quad (b=\text{Prawda} \text{ lub } b=\text{Falsz})$$

$$p(d) \cdot (1-p(c)) \cdot p(a)=0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,2=0,014 \quad \text{koszt}=400+100+200+300=1100$$

Wartość oczekiwana kosztu ekspertyzy:

$$400+p(d) \cdot 100+p(d) \cdot (1-p(c)) \cdot 200+p(d) \cdot (1-p(c)) \cdot p(a) \cdot 300=$$

$$400+0,1 \cdot 100+0,1 \cdot 0,7 \cdot 200+0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,2 \cdot 300=428,2$$

Zastosowanie przedstawionej procedury optymalizacyjnej zmniejszyło wartość oczekiwaną ekspertyzy z 611 do 428. Można oczekiwać, że w bardziej złożonych zadaniach, przy większym zróżnicowaniu kosztów pozyskiwania informacji o warunkach dopytywalnych i większym zróżnicowaniu prawdopodobieństw prawdziwości warunków dopytywalnych korzyści mogą być większe, co może mieć duże znaczenie praktyczne, gdyż w problemach o złożonej strukturze logicznej zawiodą intuicyjne sposoby poszukiwania optymalnych rozwiązań.

Przedstawioną analizę wartości oczekiwanej kosztów dla pojedynczej permutacji można wykonać dla wszystkich permutacji (w przedstawionym przykładzie jest ich  $4!=24$ ) uzyskując dokładne rozwiązanie problemu optymalizacyjnego w postaci analitycznej. W przypadku niewielkiej liczby warunków dopytywalnych podejście takie mogłoby być uzasadnione. Trzeba jednak zauważyć, że dla zadania zawierającego  $n$  warunków dopytywalnych trzeba w pesymistycznym oszacowaniu sprawdzić  $n! \cdot 2^n$  wariantów, co dla dziesięciu warunków dopytywalnych przy ścisłej optymalizacji wymagałoby zbadania kosztu ekspertyzy dla ok.  $3,7 \cdot 10^9$  przypadków. Bardziej celowa jest więc optymalizacja przybliżona, a w zadaniach takich lepiej sprawdzają się metody symulacji losowych (metody Monte Carlo). Zaletą symulacji losowych jest między innymi łatwość implementacji i mniejsze ryzyko wystąpienia systematycznych błędów metody.

**4. Podsumowanie**

W artykule przedstawiono ogólną koncepcję optymalizacji procesu pozyskiwania wiedzy faktograficznej, która może mieć zastosowanie w systemach diagnostycznych (diagnozujących układy techniczne lub organizacyjne), selekcji obiektów spełniających

pewien układ warunków (np. wybór klientów, pracowników, produktów, wariantów decyzyjnych<sup>9</sup>) oraz innych zadaniach, zwłaszcza powtarzalnych.

W szczególności zaproponowane zostały dwie metody optymalizacyjne przeznaczone dla baz wiedzy systemów ekspertowych wnioskujących w logice dokładnej i przybliżonej.

Wzbogacenie systemów ekspertowych o stosunkowo proste procedury optymalizacyjne znacząco zwiększa zakres ich stosowalności. W szczególności dotyczy to systemów z niewielkimi bazami wiedzy, w tym mikrosystemów ekspertowych<sup>10</sup>.

## Bibliografia

1. Cholewa W., Pedrycz W.: Systemy doradcze. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
2. Jashapara A.: Zarządzanie wiedzą. PWE, Warszawa 2006.
3. Kisielnicki J., Sroka H.: Systemy informacyjne biznesu. Placet, Warszawa 2005.
4. Mulawka J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997.
5. Niederliński A.: Regułowe systemy ekspertowe. Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2000.
6. Sroka H.: Systemy ekspertowe. Komputerowe wspomaganie decyzji w zarządzaniu i finansach. Akademia Ekonomiczna, Katowice 1994.
7. Stermann J.D.: Expert Knowledge Elicitation to Improve Mental and Formal Models. Working Paper no 4686, MIT, Cambridge 1997.
8. Zieliński J.: Inteligentne systemy w zarządzaniu. PWN, Warszawa 2000.
9. Zoleński W.: Narzędzia wspomagające tworzenie systemów eksperckich. Zeszyty Naukowe, s. Organizacja i Zarządzanie, z. 15, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
10. Zoleński W.: Wybrane modele interaktywnych systemów wspomaganie decyzji. Zeszyty Naukowe, nr 702, s. Ekonomiczne Problemy Usług, nr 87, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin 2012.

---

<sup>9</sup> Zoleński W.: Wybrane modele interaktywnych systemów wspomaganie decyzji. Zeszyty Naukowe, nr 702, s. Ekonomiczne Problemy Usług, nr 87, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin 2012.

<sup>10</sup> Zoleński W.: Narzędzia wspomagające tworzenie systemów eksperckich. Zeszyty Naukowe, s. Organizacja i Zarządzanie, z. 15, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.

**Abstract**

The paper presents the general concept of optimizing the process of acquiring factual knowledge, which can be used in diagnostic systems (systems diagnosed technical or organizational), selection of objects that meet a certain set of conditions (for example choice of customers, employees, products, variants of decision-making), and other tasks, especially repetitive. In particular, two methods have been proposed for optimization of knowledge bases for expert systems in logic requesting the exact and approximate. Enrichment of expert systems with relatively simple optimization procedures significantly increases the range of their applicability. In particular, this applies to systems with small knowledge bases, including microsystems expert.