

KIWIEL



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

WSPOMAGANIE DECYZJI

SYSTEMY EKSPERCKIE

pod redakcją

Romana Kulikowskiego i Lucyny Bogdan

Warszawa 1995

WSPOMAGANIE DECYZJI

SYSTEMY EKSPERCKIE

pod redakcją

Romana Kulikowskiego i Lucyny Bogdan

Warszawa 1995

Wydano z wykorzystaniem dotacji
KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

Materiały konferencji: "Analiza Decyzyjna, Systemy Ekspertskie, Zastosowania Systemów Komputerowych",
Warszawa, 25-27 maja 1994r.

Komitet Programowy Konferencji:

Andrzej Ameljańczyk, Zdzisław Bubnicki, Wiesław Grudzewski, Olgierd Hryniewicz, Janusz Kacprzyk, Lech Kruś, Roman Kulikowski (przewodniczący), Kazimierz Mańczak, Ireneusz Nykowski, Zdzisław Pawlak, Roman Słowiński, Andrzej Straszak, Andrzej Weryński, Andrzej Wierzbicki.

Wykonano z oryginałów tekstowych dostarczonych przez autorów

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1995

ISBN 83-85847-85-5

Modelowanie i symulacja w warunkach braku pełnej informacji

Eugeniusz Gatnar

Katedra Ekonometrii

Akademia Ekonomiczna im. Karola Adamieckiego w Katowicach

1 Wstęp

Wykorzystywane szeroko w badaniach naukowych modele matematyczne obarczone są powszechnie znanymi ograniczeniami. Aby je użyć, badacz musi dysponować informacjami o dokładnej postaci funkcyjnej związków pomiędzy zmiennymi w modelu. Ponadto, musi posiadać dane, będące obserwacjami zachowania się modelowanego systemu w przeszłości. Dane te powinny być ujęte liczbowo, jednorodnie, precyzyjne i obejmować w miarę długi okres czasu. W związku z tym, ich uzyskanie jest kosztowne, długotrwałe, a czasami wręcz niemożliwe, czy to ze względu na niemierzalność pewnych cech, czy też niestabilność systemu.

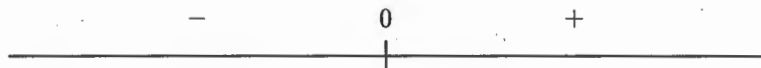
Jeśli sformułowane powyżej warunki nie są spełnione, klasycznych modeli ilościowych bezpośrednio zastosować nie można. Wynika stąd potrzeba znalezienia modeli mniej *wymagających*, pozwalających wykorzystać wiedzę niepełną, niedokładną i to zarówno o postaci relacji między elementami analizowanego systemu, jak i o charakterze tych elementów. Metody pozwalające na budowę modeli tego typu istnieją i są nazywane symbolicznymi lub **jakościowymi**, w odróżnieniu od numerycznych lub ilościowych. Zostały stworzone w połowie lat 80-tych w ramach **sztucznej inteligencji** do reprezentacji potocznej wiedzy ludzi o działaniu prostych mechanizmów i urządzeń.

2 Modelowanie jakościowe

Modele jakościowe są mniej precyzyjne niż modele oparte na równaniach różnicowych i różniczkowych, wykorzystują bowiem przedziały – zamiast liczb – do

reprezentowania wartości zmiennych, oraz klasy funkcji monotonicznych – zamiast dokładnych funkcji analitycznych – do opisu związków między zmiennymi. Z drugiej strony, są one ciągle modelami matematycznymi, złożonymi z równań, co umożliwia m. in. ich wykorzystanie do predykcji i symulacji komputerowej.

Zbiór wartości jakie może przyjmować zmienna jakościowa składa się ze skończonej liczby rozłącznych przedziałów, przy czym wartości w tym samym przedziale traktowane są jako równe. Jakościowe wartości zmiennej są właśnie nazwami tych przedziałów, zaś ich granicami są punkty, dla których następuje znacząca zmiana zachowania zmiennej. Najprostszy zbiór wartości jakościowych $Q = \{-, 0, +\}$, można zbudować dzieląc zbiór liczb rzeczywistych na dodatnie i ujemne, tj. względem punktu "0" (nazywanego punktem granicznym), jak to pokazuje rysunek 1.



Rys. 1: Graficzna reprezentacja zbioru $\{-, 0, +\}$

Obok wartości, w modelach jakościowych ujmowane są także zmiany zachowania zmiennych, poprzez ich pochodne cząstkowe względem czasu. W związku z tym określenie "x rośnie" można zapisać jako: $\partial x = +$, zgodnie z ogólnym wzorem:

$$\partial^n x = \left[\frac{d^n x}{dt^n} \right] \quad (1)$$

Związki pomiędzy zmiennymi w modelu wymagają zdefiniowania jakościowej odmiany operacji arytmetycznych. Na przykład dodawanie jakościowe dwóch zmiennych $[x]$ i $[y]$, przyjmujących wartości ze zbioru Q , tj. $[x] + [y]$, jest zdefiniowane w tabeli 1. Symbol "?" wskazuje wartość, której nie można określić nie znając rzędu wielkości zmiennych, tj. -, 0 lub +:

$[x] + [y]$	-	0	+
-	-	-	?
0	-	0	+
+	?	+	+

Tab. 1: Definicja dodawania jakościowego

Podobnie zależności pomiędzy zmiennymi opisywane są z dokładnością określającą jedynie kierunek zmian, np. $M^+(x, y)$ oznacza, że wzrost wartości zmiennej x powoduje wzrost wartości zmiennej y .

W literaturze przedmiotu najbardziej znane są cztery metody budowy i wyko-
rzystania modeli jakościowych [4]:

- **de Kleera i Browna**, opierająca się na redukcji modelowanego systemu do zbioru obiektów, połączeń między nimi oraz przekazywanego płynu, pary, elektronów, informacji, itp. [1],
- **Forbusa**, opisująca modelowany system w postaci procesów oddziałujących na obiekty i powodujących zmiany ich zachowań [2],
- **Kuipersa**, wykorzystująca do opisu modelowanego systemu jakościowe równania różniczkowe [5],
- **Morgana**, opierająca się na wektorach jakościowych, które obejmują wartość jakościową zmiennej oraz jej pierwszej i drugiej pochodnej względem czasu [6].

Symulacja i predykcja na podstawie modelu polega na wyznaczeniu sekwencji stanów jakościowych wszystkich zmiennych modelu, w postaci drzewa zachowań. Czas traktowany jest jako uporządkowany zbiór momentów (np. t_0), w których zmienne przyjmują wartości punktów granicznych oraz okresów, gdy zmienna znajduje się w przedziale pomiędzy tymi punktami (np. (t_1, t_2)).

3 Przykład modelu

Wśród wspomnianych metod, najbardziej efektywnym oraz posiadającym najlepiej określone własności matematyczne jest algorytm QSIM, stworzony przez B. Kuipersa [4]. Wykorzystuje on do opisu wartości zmiennych¹ zbiory punktów granicznych $\{g_1, g_2, g_3, \dots\}$ (ang. landmarks), tj. punktów w których pochodna zmiennej względem czasu przyjmuje wartość zero. Stan pewnej zmiennej x w chwili $t = t_i$ lub w okresie czasu $t \in (t_i, t_{i+1})$, jest określany jako para:

$$QS(x,t) = \langle qmag, qdir \rangle$$

gdzie **qmag** oznacza wartość jakościową zmiennej, zaś **qdir** – kierunek jej zmian (wartość jakościową pochodnej względem czasu):

$$qmag = \begin{cases} g_i & \text{dla } x(t) = g_i \\ (g_i, g_{i+1}) & \text{dla } x(t) \in (g_i, g_{i+1}) \end{cases} \quad (2)$$

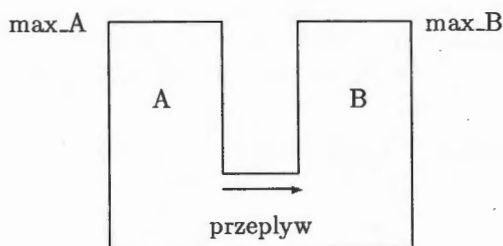
$$qdir = \begin{cases} + & \text{dla } x'(t) > 0 \\ 0 & \text{dla } x'(t) = 0 \\ - & \text{dla } x'(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

¹Przyjmuje się, że zmienne są ciągłymi funkcjami czasu.

Związki pomiędzy tak określonymi zmiennymi są charakteryzowane za pomocą predykatów, będących uogólnioną postacią operacji matematycznych. I tak:

- **ADD**(x,y,z) reprezentuje dodawanie: $z = x + y$
- **MINUS**(x,y) oznacza, że $y = -x$
- **MULT**(x,y,z) reprezentuje mnożenie: $z = x \cdot y$
- **DERIV**(x,y) oznacza, że $y = dx/dt$
- **M⁺**(x,y) reprezentuje funkcję rosnącą, tj. $y = F(x)$, gdzie $F' > 0$
- **M⁻**(x,y) reprezentuje funkcję malejącą, tj. $y = G(x)$, gdzie $G' < 0$

Przykładem systemu, którego zachowanie można symulować posługując się modelem jakościowym zbudowanym zgodnie z metodą Kuipersa, jest układ naczyń połączonych, pokazany na rys. 2.



Rys. 2: Układ naczyń połączonych

Układ ten można opisać za pomocą zmiennych reprezentujących ilość wody w naczyniach A ($ilosc_A$) i B ($ilosc_B$), a także ciśnienie ($cisn_A$ oraz $cisn_B$), od którego różnicy zależy przepływ (**przepływ**) wody pomiędzy naczyniami. Oczywiście, ciśnienie wody w naczyniu jest proporcjonalne do jej ilości, jednak dokładna postać analityczna tej zależności nie jest znana, tj.

$$\begin{aligned} cisn_A &= f(ilosc_A), f' > 0 \\ cisn_B &= g(ilosc_B), g' > 0 \end{aligned}$$

Przepływ wody pomiędzy naczyniami jest funkcją różnicy ciśnień:

$$przepływ = h(cisn_A - cisn_B), h' > 0$$

i zależy od szybkości zmian ilości wody w obu naczyniach:

$$\text{przeplyw} = \frac{d\text{ilosc}_B}{dt}$$

$$\text{przeplyw} = -\frac{d\text{ilosc}_A}{dt}$$

Aby uzupełnić opis tego systemu za pomocą algorytmu QSIM, należy jeszcze wprowadzić zmienne pomocnicze (ilosc_ca, rozn_cis, -przeplyw). Zatem model składa się z 8 zmiennych, dla których określono jednocześnie zbiory punktów granicznych²:

```

ilosc_A   - {0,maxA,inf}
ilosc_B   - {0,maxB,inf}
cisn_A    - {0,inf}
cisn_B    - {0,inf}
ilosc_ca  - {0,I*,inf}
rozn_cis  - {minf,0,inf}
przeplyw  - {minf,0,inf}
-przeplyw - {minf,0,inf}

```

Związki pomiędzy tymi zmiennymi reprezentuje zbiór predykatów QSIM (wraz z punktami korespondującymi³):

```

M+(ilosc_A,cisn_A)           (0,0) (inf,inf)
M+(ilosc_B,cisn_B)           (0,0) (inf,inf)
ADD(ilosc_A,ilosc_B,ilosc_ca) (0,0,0)
ADD(rozn_cis,cisn_B,cisn_A)  (0,0,0)
M+(rozn_cis,przeplyw)        (0,0) (inf,inf)
DERIV(ilosc_B,przeplyw)
MINUS(przeplyw,-przeplyw)    (inf,minf) (minf,inf)
DERIV(ilosc_A,-przeplyw)

```

4 Wyniki symulacji za pomocą algorytmu QSIM

Jeśli teraz do naczynia A zostaje wlana woda w ilości I^* (która pozostaje stała), to wypełni je ona całkowicie (tj. osiągając poziom maksymalny max_A), zaś naczynie B będzie początkowo puste (np. zakładając, że przewód łączący naczynia ma bardzo mały przekrój). Ponieważ naczynia są połączone, woda zaczyna przepływać pomiędzy nimi, powodując zmniejszanie jej ilości w A, a wzrost w naczyniu B. Symulacja zaczyna się więc od stanu początkowego S_0 , w którym zmienne przyjmują wartości jakościowe:

$$QS(\text{ilosc}_A, t_0) = \langle \text{max}_A, - \rangle$$

$$QS(\text{ilosc}_B, t_0) = \langle 0, + \rangle$$

²Symbole minf oraz inf oznaczają odpowiednio: $-\infty$ i $+\infty$.

³Są to wartości, które zmienne występujące w predykcji przyjmują w tym samym momencie czasu.

$QS(\text{ilosc_ca}, t_0) = \langle I^*, 0 \rangle$
 $QS(\text{cisl_A}, t_0) = \langle (0, \text{inf}), - \rangle$
 $QS(\text{cisl_B}, t_0) = \langle 0, + \rangle$
 $QS(\text{rozn_cis}, t_0) = \langle (0, \text{inf}), - \rangle$
 $QS(\text{-przeplyw}, t_0) = \langle (\text{minf}, 0), + \rangle$
 $QS(\text{przeplyw}, t_0) = \langle (0, \text{inf}), - \rangle$

i daje w efekcie zbiór stanów:

Stan: S0 Czas: t0

Poprzedni stan: brak

Następne stany: S1

Zmienna	Stan	Zbiór wartości
ilosc_A	$\langle \text{maxA}, - \rangle$	$\{0, \text{maxA}, \text{inf}\}$
ilosc_B	$\langle 0, + \rangle$	$\{0, \text{maxB}, \text{inf}\}$
cisl_A	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
cisl_B	$\langle 0, + \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
ilosc_ca	$\langle I^*, 0 \rangle$	$\{0, I^*, \text{inf}\}$
rozn_cis	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$
przeplyw	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$
-przeplyw	$\langle (\text{minf}, 0), + \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$

Stan: S1 Czas: (t0, t1)

Poprzedni stan: S0

Następne stany: S2 S3 S4

Zmienna	Stan	Zbiór wartości
ilosc_A	$\langle (0, \text{maxA}), - \rangle$	$\{0, \text{maxA}, \text{inf}\}$
ilosc_B	$\langle (0, \text{maxB}), + \rangle$	$\{0, \text{maxB}, \text{inf}\}$
cisl_A	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
cisl_B	$\langle (0, \text{inf}), + \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
ilosc_ca	$\langle I^*, 0 \rangle$	$\{0, I^*, \text{inf}\}$
rozn_cis	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$
przeplyw	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$
-przeplyw	$\langle (\text{minf}, 0), + \rangle$	$\{\text{minf}, 0, \text{inf}\}$

Stan: S2 Czas: t1

Poprzedni stan: S1

Następne stany: S5

Zmienna	Stan	Zbiór wartości
ilosc_A	$\langle (0, \text{maxA}), - \rangle$	$\{0, \text{maxA}, \text{inf}\}$
ilosc_B	$\langle \text{maxB}, + \rangle$	$\{0, \text{maxB}, \text{inf}\}$
cisl_A	$\langle (0, \text{inf}), - \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
cisl_B	$\langle (0, \text{inf}), + \rangle$	$\{0, \text{inf}\}$
ilosc_ca	$\langle I^*, 0 \rangle$	$\{0, I^*, \text{inf}\}$

rozn_cis	<(0,inf),->	{minf,0,inf}
przeplyw	<(0,inf),->	{minf,0,inf}
-przeplyw	<(minf,0),+>	{minf,0,inf}

Stan: S3 Czas: t1

Poprzedni stan:	S1	
Nastepne stany:	brak	
Zmienna	Stan	Zbior wartosci
ilosc_A	<G1,0>	{0,G1,maxA,inf}
ilosc_B	<maxB,0>	{0,maxB,inf}
cisn_A	<G1,0>	{0,G1,inf}
cisn_B	<G1,0>	{0,G1,inf}
ilosc_ca	<I*,0>	{0,I*,inf}
rozn_cis	<0,0>	{minf,0,inf}
przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}
-przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}

Stan: S4 Czas: t1

Poprzedni stan:	S1	
Nastepne stany:	brak	
Zmienna	Stan	Zbior wartosci
ilosc_A	<G2,0>	{0,G2,maxA,inf}
ilosc_B	<G1,0>	{0,G1,maxB,inf}
cisn_A	<G2,0>	{0,G2,inf}
cisn_B	<G2,0>	{0,G2,inf}
ilosc_ca	<I*,0>	{0,I*,inf}
rozn_cis	<0,0>	{minf,0,inf}
przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}
-przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}

Stan: S5 Czas: (t1,t2)

Poprzedni stan:	S2	
Nastepne stany:	S6	
Zmienna	Stan	Zbior wartosci
ilosc_A	<(0,maxA),->	{0,maxA,inf}
ilosc_B	<(maxB,inf),+>	{0,maxB,inf}
cisn_A	<(0,inf),->	{0,inf}
cisn_B	<(0,inf),+>	{0,inf}
ilosc_ca	<I*,0>	{0,I*,inf}
rozn_cis	<(0,inf),->	{minf,0,inf}
przeplyw	<(0,inf),->	{minf,0,inf}
-przeplyw	<(minf,0),+>	{minf,0,inf}

Stan: S6 Czas: t2
 Poprzedni stan: S5
 Następnne stany: brak

Zmienna	Stan	Zbiór wartości
ilosc_A	<G3,0>	{0,G3,maxA,inf}
ilosc_B	<G2,0>	{0,maxB,G2,inf}
cisn_A	<G3,0>	{0,G3,inf}
cisn_B	<G3,0>	{0,G3,inf}
ilosc_ca	<I*,0>	{0,I*,inf}
rozn_cis	<0,0>	{minf,0,inf}
przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}
-przeplyw	<0,0>	{minf,0,inf}

Wyniki symulacji zachowania układu naczyń połączonych tworzą drzewo 6 stanów, reprezentujące jego trzy różne zachowania:

$S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5 \rightarrow S_6$
 $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3$
 $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_4$

Oznacza to, iż ilość wody w obu naczyniach stabilizuje się na poziomie:

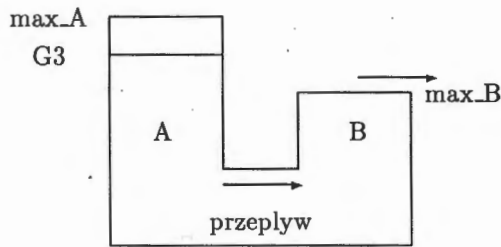
- niższym (G_1) od maksymalnego ($\max A$) w naczyniu A, oraz maksymalnym ($\max B$) w naczyniu B,
- niższym (G_2) od maksymalnego zarówno w naczyniu A, jak i (G_1) w naczyniu B,
- niższym (G_3) od maksymalnego ($\max A$) w naczyniu A, oraz wyższym (G_2) od maksymalnego ($\max B$) w naczyniu B, co oznacza, że woda się z niego wylewa.

Wszystkie trzy zachowania są równie prawdopodobne, ponieważ nic nie wiadomo o relacji pomiędzy pojemnością obu naczyń ($\max A$ i $\max B$). Może bowiem zachodzić sytuacja pokazana na rysunku 3.

Warto też zauważyć, że kierunki zmian wszystkich zmiennych w stanach: S3, S4 i S6 przyjmują wartość zero, co oznacza osiągnięcie stanu równowagi systemu.

5 Konkluzje

Metody jakościowe pozwalają przewidzieć zachowanie systemu jedynie na podstawie jego struktury, tj. modelu. Zachowanie to, a raczej zbiór zachowań, reprezentowany jest w postaci sekwencji stanów wszystkich zmiennych, które tworzą rozbudowane drzewo, ze względu na niedeterministyczny charakter rachunku



Rys. 3: Układ naczyń połączonych opisany przez stan S6

jakościowego. Ważne jest także to, iż opis tej struktury nie musi być precyzyjny, ani pełny.

Do najważniejszych zalet modeli jakościowych można zaliczyć:

- brak potrzeby posiadania wszystkich informacji o zjawisku,
- możliwość wykorzystania znanych praw fizycznych, ekonomicznych, itp.
- fakt, że model odzwierciedla podstawowe związki przyczynowo-skutkowe występujące pomiędzy elementami zjawiska,
- podobieństwo do potocznego ujmowania zjawisk przez człowieka,
- fakt, że model jakościowy reprezentuje klasę modeli ilościowych,
- zamiast pomiaru wartości zmiennych stosuje się rozpoznanie i agregację.

Wykorzystanie modeli jakościowych może poprzedzać budowę kosztownych modeli ilościowych, np. ekonometrycznych [3]. Przede wszystkim jednak pozwala prowadzić modelowanie i symulację w sytuacji, gdy brak jest pełnych i dokładnych danych o zachowaniu badanego systemu, tj. zarówno wartości obserwacji, jak i wiedzy badacza.

Literatura

- [1] De Kleer J., Brown J. S., A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artificial Intelligence*, Vol. 24 (1984).
- [2] Forbus K. D., Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, Vol. 24 (1984).
- [3] Gatnar E., Economic Modeling with Incomplete Knowledge, *Cahiers de Recherche*, No. 4, Toulouse 1993.

- [4] Gatnar E., Metody Modelowania Jakościowego, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
- [5] Kuipers B. J., Qualitative Simulation, *Artificial Intelligence*, Vol. 29 (1986), No. 1.
- [6] Morgan A. J., Predicting behaviour of dynamic systems with qualitative vectors, w: Hallam J., Mellish C. (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence*, Wiley, London 1987.

ISBN 83-85847-85-5

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy
prosimy o kontakt
z Instytutem Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 36-19-01 w. 241 e-mail: kotuszew@ibspan.waw.pl**