

УДК 004.45(075.8)

Голдаєвич Є.Л.,
канд.ф.-м.наук.,
доцент АМУ

ПРОБЛЕМНІ ЗАДАЧІ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ: КОГНІТИВНИЙ АНАЛІЗ СЛАБО СТРУКТУРОВАНИХ СИТУАЦІЙ

Запропоновано апарат нечітких когнітивних карт для моделювання слабоструктурованих ситуацій, що надає можливість системного якісного урахування віддалених наслідків рішень, що приймаються, і виявлення побічних ефектів, які можуть перешкодити реалізації, здавалося б, очевидних рішень і які важко оцінити інтуїтивно при великому числі чинників і різноманітні численних шляхів взаємодії між ними.

Предложен аппарат нечетких когнитивных карт для моделирования слабоструктурированных ситуаций, предоставляющий возможность системного качественного учета отдаленных последствий принимаемых решений и выявления побочных эффектов, которые могут помешать реализации, казалось бы, очевидных решений и которые трудно оценить интуитивно при большом числе факторов и многообразии многочисленных путей взаимодействия между ними.

The Fuzzy Cognitive Maps apparatus is offered for the modelling of the weakly structured situations, that gives a possibility of system qualitative taking into account of remote consequences for made decision and exposure of side effects which can prevent to realization, it would seem, obvious decisions and which it is difficult to estimate intuitively at the large number of factors and variety of numerous paths of interaction between them.

Вступ. Серед завдань управління складними системами (соціально-економічними, техніко-технологічними, бізнес-структурами, політичними структурами і тому подібне) найбільш важкими є комплексні задачі, мета яких - змінити в бажану сторону траєкторію системи в просторі її станів. В цьому випадку об'єктом управління є уся проблемна область, яка розглядається як динамічна ситуація (система), що складається з множини різнорідних взаємодіючих чинників. Деякі з цих чинників безпосередньо залежать від рішень осіб, приймаючих рішення (ОПР), інші залежать від ОПР побічно (через ланцюжки інших чинників), треті не залежать від ОПР зовсім (наприклад, зміни в законодавстві). При спробах використання інформаційних технологій для вирішення такого роду завдань, як правило,

доводиться стикатися з тим, що - на відміну від більшості звичайних технічних систем - об'єкт управління не лише не формалізований, але і слабо структурований. Це виражається в наступному:

- система чинників (концептів) і зв'язків між ними (відношень) не визначена з достатньою повнотою: відомі основні концепти, проте багато чинників, зв'язки і параметри з'ясовуються тільки в процесі постановки задачі;

- основні параметри системи (значення чинників, міра впливу одних чинників на інших) є не кількісними, а якісними, тобто є не числа, а або інтервали, що характеризують точність оцінки, або нечіткі величини, або лінгвістичні оцінки, що утворюють лінійно впорядковану шкалу;

- значення параметрів системи набуті, як правило, шляхом опитування експертів, і тому є їх суб'єктивними оцінками. Це відноситься і до тих чинників і зв'язків, які виражаються кількісно в результаті обробки даних статистики, оскільки одні і ті ж чинники різними джерелами оцінюються по-різному. Остаточні значення параметрів, що вносяться експертом в модель проблемної ситуації, є результатом його суб'єктивної обробки даних про систему, що включає вибір однієї з оцінок (чи їх зважену суму), врахування достовірності даних, репутацію джерела і так далі;

- заздалегідь сформульовані альтернативи керуючих рішень в такого роду системах нечисленні і часто-густо очевидні; неочевидні альтернативи, серед яких, як правило, виявляються кращі, виникають лише в процесі аналізу ситуації;

- при оцінці виявлених альтернатив потрібно враховувати динаміку системи: прогноз її розвитку при діях різних чинників, можливість виникнення побічних наслідків і т. д.

Через ці особливості при ухваленні рішень в слабо структурованих системах підходи імітаційного моделювання, орієнтовані на використання кількісних об'єктивних оцінок, і методи традиційної теорії ухвалення рішень, що спирається на методи вибору кращої альтернативи з безлічі чітко сформульованих альтернатив, виявляються недостатніми. Матеріал, на основі якого приймаються рішення в таких слабо структурованих проблемних ситуаціях, неминуче містить істотну долю якісних, нечітких, суб'єктивно оцінених даних і по суті є уявленням знань експерта (чи групи експертів) про ситуацію, що описує стан складної системи управління.

Використання формальних методів і відповідних інформаційних технологій для управління траєкторією системи в слабоструктурованих проблемних областях, повинна передувати підготовча робота, що складається з наступних 3-х етапів.

1. Структуризація проблемної області, тобто формування системи чинників і зв'язків між ними.

2. Параметризація отриманої системи чинників і зв'язків, тобто опис допустимих областей значень, як правило, якісних і нечітких.

3. Формалізація предметної області, тобто вибір моделі, яка характеризується видом функцій, що визначають вплив зв'язків на чинники, і методами їх обчислення.

Один з підходів до аналізу слабо структурованих систем, що сформувався в останні десятиліття, носить назву когнітивного аналізу або когнітивного моделювання. Мета когнітивного моделювання полягає в генерації і перевірці гіпотез про функціонування і структуру спостережуваної системи для отримання функціональної моделі, здатної пояснити поведінку системи, що вивчається. Когнітивне моделювання в системах підтримки прийняття рішень орієнтоване на те, щоб активізувати інтелектуальні процеси експерта і допомогти йому зафіксувати своє представлення проблемної ситуації у вигляді формальної моделі. Когнітивний аналіз базується на понятті когнітивної карти - представленні експерта про систему у вигляді елементарних семантичних категорій (ознак, фактів, подій, понять, що мають відношення до конкретної ситуації), пов'язаних відношеннями (причинно-наслідковими зв'язками між семантичними категоріями). Як правило, когнітивна карта є знаковим оргграфом $G(F, W)$, дугам (орієнтованим ребрам) якого поставлені у відповідність ваги. Множина вершин $F = \{f_i\}$ когнітивної карти відповідає чинникам (концептам), що визначають ситуацію, а множина дуг $W = \{w_{ij}\}$ - причинно-наслідковим (каузальним) зв'язкам між чинниками. Когнітивні карти служать як засобом структуризації і формалізації ситуації, так і засобом її аналізу. Різні інтерпретації вершин, дуг і вагів на дугах, а також різні функції, що визначають вплив зв'язків на чинники, призводять до різних моделей і методів їх аналізу.

1. Когнітивні моделі

У основі технології когнітивного аналізу і моделювання лежить когнітивна (пізнавально-цільова) структуризація знань про об'єкт і зовнішнє для нього середовище, причому об'єкт і зовнішнє середовище розмежовуються «нечітко».

Мета такої структуризації полягає у виявленні найбільш суттєвих (базисних) чинників, що характеризують «граничний» шар взаємодії об'єкта і зовнішнього середовища, і встановлення якісних (причинно-наслідкових) зв'язків між ними, тобто який взаємовплив роблять чинники один на одного в ході їх зміни. Взаємовплив чинників відображується за допомогою когнітивної карти (моделі).

Для вивчення впливу зміни параметрів вершин, а також обліку впливу контурів зворотного зв'язку користуються правилом імпульсного процесу в знакових і зважених оргграфах, який встановлює, як відхилення однієї або декількох змінних поширюються за деякий час по системі. Аналіз знакових графів допомагає позбавитися від цілого ряду типових

помилки, властивих несистемному підходу (наприклад, нерідко дослідник вважає, що кожна подія має тільки одну причину, не помічаючи важливих зворотніх зв'язків, як позитивних, так і негативних).

Ідея використання знакових графів для аналізу слабоструктурованих проблемних областей належить Аксельроду [1]. Основні властивості знакових графів описані в [2]. Знаковий граф - це оргграф, дуги якого мають ваги +1 або -1, що скорочено означають знаками "+" і "-". Знак "+" означає позитивний зв'язок, знак "-" означає негативний зв'язок. Вага шляху дорівнює добутку вагів його ребер, тобто позитивний, якщо число негативних ребер в ньому парне, і негативний, якщо це число непарне. При позитивному зв'язку зростання чинника-причини призводить до зростання чинника-наслідку, а при негативному зв'язку зростання чинника-причини призводить до зменшення чинника-наслідку. Якщо ж від вершини f_i до вершини f_j ведуть як позитивні, так і негативні шляхи, то питання про характер впливу чинника f_i на чинник f_j залишається невизначеним.

У роботі [3] введено поняття нечітких когнітивних карт (НКК), яке отримало розвиток у великій кількості наступних робіт. Залежно від інтерпретацій і вирішуваних завдань розглядаються різні модифікації НКК. У загальному випадку НКК - це зважений оргграф, в якому, як і в знаковому графові, вершини представляють чинники (концепти), а дуги - зв'язки між чинниками, які інтерпретуються як причинно-наслідкові (каузальні) зв'язки. Ваги ребер - це або числа з відрізка $[-1, 1]$, або значення з деякої лінгвістичної шкали типу {малий, середній, великий, дуже великий}, які характеризують силу впливу відповідного зв'язку або (у деяких інтерпретаціях) міру впевненості в наявності цього зв'язку. При аналізі НКК використовують апарат нечіткої математики, що включає нечітку арифметику, нечітку і лінгвістичну логіку, теорію можливостей, теорію нечітких множин.

Істотним узагальненням когнітивної карти є модель когнітивної карти, керованої нечіткими правилами (англ. Rule Based Fuzzy Cognitive Map - RBFCM)[4]. Нечіткі правила (продукції) мають форму пропозицій виду

ЯКЩО $x_1 \in A_1, x_2 \in A_2, \dots$ ТО $y_1 \in B_1, y_2 \in B_2, \dots$,

де $X=\{x_i\}$ - вектор вхідних змінних, $Y=\{y_j\}$ - вектор вихідних змінних, $A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ - нечіткі (лінгвістичні) значення. Умовна частина продукції є виразом нечіткої логіки над лінгвістичними значеннями чинників і стосунками між ними. Посилка правила описує умови його застосовності, а висновок правила визначає функції приналежності лінгвістичних значень вихідних змінних. Дуги графа відповідають відношенням впливу, що виражені умовними частинами правил; кожному чиннику зіставляється база правил, що складається з усіх продукцій, що мають у висновку цей чинник. Структура когнітивної карти, керованої нечіткими правилами, показана на рис. 1.

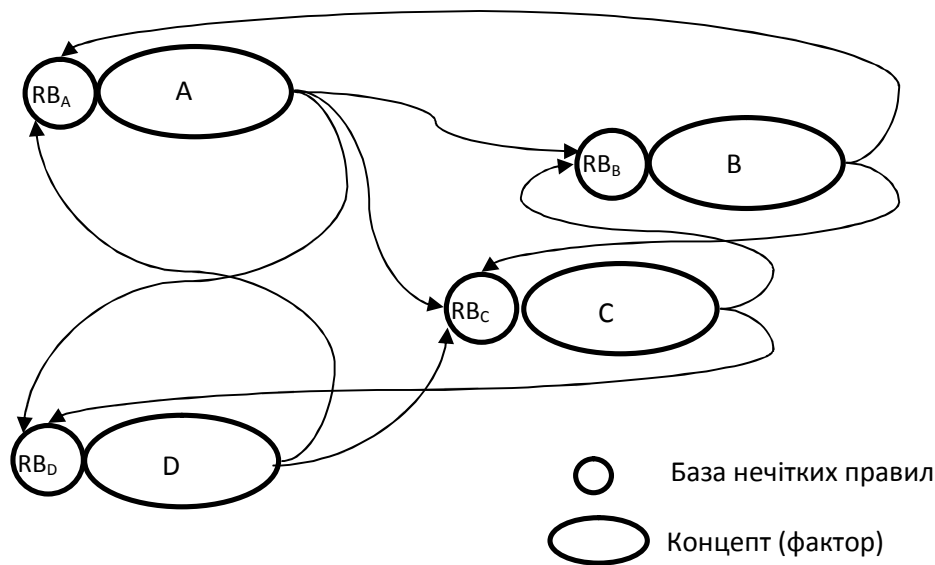


Рис. 1. Структура когнітивної карти, керованої нечіткими правилами

2. Аналіз впливів в когнітивних картах

При аналізі ситуацій, що спирається на описані вище моделі когнітивних карт, вирішуються два типи завдань: статичні і динамічні. Статичний аналіз - це аналіз поточної ситуації, що полягає у виділенні і зіставленні шляхів впливу одних чинників на інших через треті (каузальних ланцюжків). Динамічний аналіз - це генерація і аналіз можливих сценаріїв розвитку ситуації в часі. Математичним апаратом аналізу є теорія знакових графів і нечітких графів.

Задачі статичного аналізу, що розглядаються в термінах знакових графів, - це дослідження впливів одних чинників на інших, дослідження стійкості ситуації в цілому і пошук структурних змін для отримання стійких структур. Чинник f_i впливає на чинник f_j , якщо існує орієнтований шлях від вершини f_i у вершину f_j . Як вже говорилося вище, сумарний вплив f_i на f_j позитивний, якщо усі шляхи від f_i до f_j позитивні; негативний, якщо усі шляхи негативні; невизначений, якщо серед цих шляхів є як позитивні, так і негативні.

Одна з основних заач, що вирішується в термінах знакових графів, - це задача про стійкість. У цій задачі ребра графа інтерпретуються як деякі (необов'язково каузальні) відношення. Якщо відношення симетричні, то ситуація представляється неорієнтованим знаковим графом, вершини якого відповідають суб'єктам відношень.

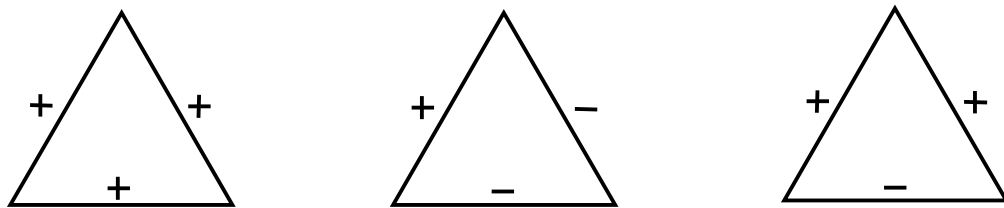


Рис. 2. Позитивні і негативні цикли неорієнтованих знакових графів

Неорієнтований знаковий граф збалансований, якщо усі його цикли позитивні. (На рис. 2 перші два графи збалансовані, третій - ні.) В цьому випадку усі вершини можна розбити на два класи так, що ребра, що сполучають вершини одного класу, позитивні, а ребра, що сполучають вершини різних класів, негативні. У збалансованій ситуації усі суб'єкти відношення розбиті на дві коаліції, що знаходяться в опозиції. Така ситуація стійка в тому сенсі, що зважаючи на однорідність стосунків членів однієї коаліції як один до одного, так і до членів іншої коаліції, немає передумов для зміни ситуації. Приклад - двопартійна парламентська система в США. Динаміка розвитку ситуації при цьому не розглядається; прогноз полягає в тому, що якщо ситуація стійка, вона зберігатиметься і надалі; якщо ж вона нестійка, то характер зв'язків швидше за все мінятиметься.

Якщо відношення між чинниками несиметричні, то когнітивна карта є знаковим оргграфом. Позитивний цикл - це контур позитивного зворотного зв'язку; якщо чинникам надані деякі ваги (значення), то збільшення ваги чинника в циклі веде до його подальшого збільшення і, кінець кінцем, необмеженого зростання. Негативний цикл протидіє відхиленням від початкового стану, проте можлива нестійкість у вигляді значних коливань, що виникають при проходженні збурення по циклу. Розрізняють випадки лінійного, експоненціального зростання значень чинників [2], а також випадок знакозмінної зміни і зростання значень чинників (резонансу)[5].

Аналіз стійкості графа припускає пошук структурних змін графа для отримання стійкої збалансованої структури. Існує ряд методів, спрямованих на пошук структурних змін графа для отримання стійких структур.

Аналіз впливів і збалансованості розглянемо на прикладі когнітивної карти на рис. 3, що описує ситуацію з енергопостачанням деякого регіону [2].

Вплив чинника "Споживання електроенергії" на чинник "Вартість електроенергії" відбувається по двох шляхах. Шлях довжини 1 (прямий вплив) - позитивний: зростання споживання, тобто збільшення попиту,

веде до зростання вартості. З іншого боку, є шлях довжини 2: зростання споживання повинне викликати зростання енергетичних потужностей, яке, у свою чергу повинне понизити вартість електроенергії. Сумарний вплив виявляється невизначеним.

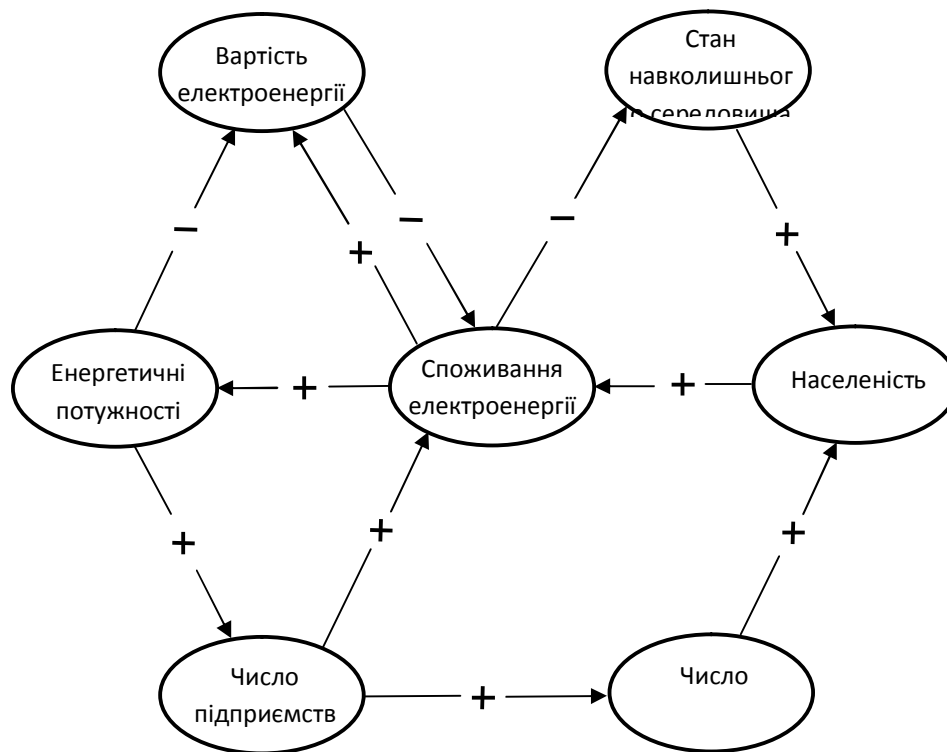


Рис. 3. Когнітивна карта системи енергопостачання регіону.

Цикл "Споживання електроенергії" - "Стан довкілля" - "Населеність" є негативним: передбачається, що стан довкілля безпосередньо позитивно впливає на зростання населення, а споживання електроенергії погіршує стан довкілля. Тому в цьому циклі можливі коливання станів усіх трьох чинників.

Цикл "Число підприємств" - "Споживання електроенергії" - "Енергетичні потужності" позитивний (у припущенні, що зростання енергетичних потужностей прямо впливає на зростання числа підприємств). Тому в нім в принципі можливе постійне зростання усіх трьох чинників. Це ж можна сказати і про цикл з 5 чинників, отриманий додаванням чинників "Населеність" і "Число робочих місць".

Знакові графи успішно використовуються для вирішення багатьох прикладних завдань (численні приклади є в книзі [2]). Проте наявність тільки двох видів оцінок зв'язків +1 і -1 породжує два основні недоліки цієї моделі: відсутність врахування сили впливу по різних шляхах і відсутність механізму розв'язку невизначеностей при одночасному

існуванні позитивних і негативних шляхів між двома вершинами. Ці недоліки утруднюють вибір рішень при управлінні ситуацією.

Задача управління в когнітивних картах ставиться таким чином. Серед чинників ситуації виділяються чинники (чинники, на які ОПР має можливість безпосередньо впливати), що управляють, і цільові чинники, зміна або стабілізація яких є метою управління. Конкретне управлінське рішення (стратегія) - це вибір деякої множини керуючих чинників.

В описаних вище інтерпретаціях знакового графа можливості порівняння і ранжирування рішень дуже обмежені. Їх можна порівнювати тільки по множині цільових чинників, на які вони чинять потрібний (позитивний або негативний) вплив. При збігу цих множин немає можливості порівнювати рішення по силі впливу. Крім того, досить часто виникнення невизначеностей взагалі не дає можливості оцінити рішення навіть по знаку його впливу на цільові чинники.

В рамках знакових графів ці труднощі усуває підхід, розвинений в роботі [6]. Він залишає граф знаковим, але пропонує набагато тонший його аналіз. Він ґрунтується на наступних допущеннях:

- сила впливу одного чинника на іншій по певному шляху залежить від довжини цього шляху (тобто числа ребер в нім);
- чим більше паралельних впливів (по різних шляхах) існує між чинниками, тим сильніше вплив між ними.

Хай $p_{ij}^{(m)}$ і $n_{ij}^{(m)}$ - m -і позитивний і негативний впливи шляхів довжини m , що йдуть від чинника f_i до чинника f_j , відповідно. Тоді сумарний позитивний і негативний впливи чинника f_i на чинник f_j визначаються таким чином:

$$P_{ij} = \sum_{m=1}^{k_p} g(m) p_{ij}^{(m)} - \text{позитивний вплив};$$

$$N_{ij} = \sum_{m=1}^{k_N} g(m) n_{ij}^{(m)} - \text{негативний вплив};$$

де $g(m)$ - монотонно-неспадна функція довжини шляху m , що визначає міру послаблення впливу на шляху від f_i до f_j . В якості $g(m)$ вибирається диференційована функція виду

$$g(m) = zm \quad (z > 0),$$

де z - коефіцієнт, що визначає міру послаблення. Із зменшенням z зменшується вплив довгих шляхів на кінцевий результат; тому, змінюючи z , можна аналізувати вплив шляхів різної довжини.

Помітимо, що при першому допущенні в графі на рис. 3 прямий позитивний вплив зростання споживання електроенергії на її вартість більше його ж негативного впливу на вартість через зростання енергетичних потужностей.

Для порівняння різних стратегій розглядаються різні варіанти оцінної функції $f(s_{ij}, c_{ij})$, де s_{ij} - сумарний вплив чинника f_i на чинник f_j , c_{ij}

- консонанс впливу чинника i на чинник j , які визначаються з наступних співвідношень:

$$s_{ij} = P_{ij} + N_{ij} ,$$

$$c_{ij} = (P_{ij} - N_{ij}) / (P_{ij} + N_{ij}) .$$

Консонанс c_{ij} - це міра відмінності між позитивним і негативним впливом. Чим він більший, тим визначеніше характер впливу .

Функція $f(s_{ij}, c_{ij})$ повинна задовольняти, зокрема, наступним вимогам:

1. Нехай стратегія i характеризується парою (s_{ij}, c_{ij}) , а стратегія i' - парою $(s_{i'j}, c_{i'j})$. Тоді, якщо $f(s_{ij}, c_{ij}) > f(s_{i'j}, c_{i'j})$, то i прийнятніше за i' .
2. Якщо $c_{ij} = 0$, то $f(s_{ij}, c_{ij}) = 0$ при будь-яких s_{ij} .
3. Якщо $c_{ij} > 0$, то $f(s_{ij}, c_{ij})$ монотонно зростає по обох змінних; якщо $c_{ij} < 0$, то $f(s_{ij}, c_{ij})$ монотонно спадає по обох змінних.

При деяких розумних допущеннях доцільно вибирати оцінну функцію у вигляді $f(s, c) = f_s(s) f_c(c)$.

Детальніші характеристики взаємодії чинників з'являються при використанні нечітких когнітивних карт. Найбільш поширений підхід до обчислення нечітких впливів, запропонований в [7], полягає в наступному. Нехай між f_i і $f_j \in m$ шляхів і $I_r(f_i, f_j)$ означає вплив f_i на f_j по r -му шляху, а $S(f_i, f_j)$ - максимальний вплив f_i на f_j по усіх m шляхах. Тоді

$$I_r(f_i, f_j) = \min_p \sum_{p=i}^j w_{p,p+1}^{(r)} ,$$

$$S(f_i, f_j) = \max_{1 \leq r \leq m} I_r(f_i, f_j) ,$$

де $w_{p,p+1}^{(r)}$ - вага дуги від f_p до f_{p+1} на r -му шляху, $p = \overline{i, j}$.

Таким чином, операція $I_r(f_i, f_j)$ виділяє найбільш слабкий зв'язок в r -му шляху, а операція $S(f_i, f_j)$ виділяє найбільш сильний з множини зв'язків $\{I_r(f_i, f_j)\}$.

У роботі [7] запропонована модифікована модель впливів. У цій моделі вершина може знаходитися в активному або пасивному стані, крім того, кожній вершині приписаний поріг. Вершина переходить в активний стан тільки якщо сума вхідних впливів досягає порогу. Тільки у активному стані вершина передає вплив далі.

3. Задачі динамічного аналізу

У задачах динамічного аналізу нечіткі величини приписуються не лише зв'язкам, але і чинникам. При цьому, якщо ваги зв'язків в процесі аналізу вважаються постійними, то величина, приписана чиннику f_i , - це значення деякої функції $y_i(t)$ від вагів вхідних дуг і значень чинників, вхідних для f_i , яке змінюється з часом. Вектор $Y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$ значень усіх чинників ситуації у момент t утворює стан системи у момент t . Сукупність вагів ребер w_{ij} задається матрицею суміжності $\|w_{ij}\|$ графа $G(F, W)$. Наявність величини у чинника дозволяє не лише оцінити силу впливу на

чинник, але і виразити результат сумарних впливів у вигляді конкретного значення чинника. Поняття стану ситуації дозволяє говорити про розвиток ситуації в часі під дією різних зовнішніх дій, що виражаються в зміні значень чинників, тобто ставити завдання прогнозу (пряма задача), а також досліджувати можливості управління ситуацією, тобто шукати дії, що призводять до потрібного (цільового) стану (зворотня задача).

У загальному випадку функції, приписані різним чинникам, різні, що призводить до структури, схожої з НКК, керованою правилами і описаною вище. Обчислювальна складність аналізу такої НКК дуже велика. Тут ми розглянемо простіший, але досить реалістичний для багатьох прикладних задач випадок, коли ці функції, по-перше, для усіх чинників однакові, а по-друге, залежать не від значень вхідних чинників, а від їх приростів (тобто вважаємо, що величина приросту в будь-якому стані впливає однаково).

Вважатимемо, що область значень кожного чинника f_i - це лінійно впорядкована множина (шкала) лінгвістичних значень $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iq(i)}\}$, де z_{i1} і $z_{iq(i)}$ - мінімальний і максимальний елементи множини, відповідно. З $k < l$ виходить $z_{ik} < z_{il}$. Потужності шкал $q(i)$ для різних чинників різні. Приріст значення чинника визначається для поточного значення чинника і характеризується знаком приросту та його величиною. Для поточного значення $y_i(t) = z_{im}$ перехід до елементів $z_{i(m+1)}, z_{i(m+2)}, \dots, z_{iq(i)}$ дає Z_i позитивний приріст P^+ ; негативний приріст P^- виходить при переході до $z_{i(m-1)}, z_{i(m-2)}, \dots, z_{i1}$. У загальному випадку при переході від z_{im} до z_{il} вважаємо $P = l - m$. Очевидно, що при $m < l$ приріст буде позитивним, а при $m > l$ - негативним.

Для тоншого аналізу ситуації (а також для зручності обчислень) визначимо відображення: $Z_i \rightarrow [0, 1]$ дискретної лінгвістичної шкали $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir}\}$ на відрізок $[0, 1]$ таким чином. Розіб'ємо відрізок $[0, 1]$ на r рівних відрізків, межі яких позначимо в порядку зростання $b_0 = 0, b_1, \dots, b_{r-1}, b_r = 1$. Покладемо $z_{ik} = (b_{k-1} + b_k)/2$ (елемент z_{ik} відображується в середину k -го відрізка).

Відображення дозволяє алгоритми моделі зробити числовими. Зворотне відображення: $[0, 1] \rightarrow Z_i$ є гомоморфізмом: усі точки, що лежать в інтервалі (b_{k-1}, b_k) , відобразяться в одну точку z_{ik} . За допомогою відображення стан ситуації представляється в числовому вигляді: $X(t) = (Y(t)) = (\{y_1(t), \dots, y_n(t)\})$. Подальші обчислення проводяться з числовим представленням стану ситуації $X(t)$. Зворотне відображення використовується тільки для якісних інтерпретацій результатів аналізу.

3.1. Отримання прогнозу розвитку ситуації (пряма задача)

Завдання прогнозу формулюється так. Задані:

- когнітивна карта $G(F, W)$, де F - множина вершин (чинників ситуації), W - матриця суміжності;
- множина $\{Z_1, \dots, Z_n\}$ шкал усіх чинників ситуації;

- початковий стан ситуації $X(0) = \{x_1(0), \dots, x_n(0)\}$;

- початковий вектор приростів чинників ситуації $P(0) = \{p_1(0), \dots, p_n(0)\}$.

Необхідно знайти стани ситуації $X(1), \dots, X(n)$ і вектори приростів $P(1), \dots, P(n)$ в послідовні дискретні моменти часу $1, \dots, n$, де n (число вершин) вибране для того, щоб вплив початкового збурення міг досягти усіх вершин.

Прогноз розвитку ситуації визначається за допомогою матричного співвідношення:

$$P(t+1) = P(t) \circ W,$$

Де символ " \circ " означає max-product правило:

$$p_i(t+1) = \max_j (| p_j(t) \cdot w_{ji} |)$$

Таким чином, приріст $p_i(t+1)$ - це максимальна з величин $p_j(t) w_{ji}$, де максимум береться по усіх чинниках, вхідних для чинника f_i (для інших чинників $w_{ji} = 0$).

Схема роботи з моделлю виглядає таким чином. Експерт задає в лінгвістичних значеннях початковий стан ситуації $Y(0)$ і наступний стан $Y(1)$, що виникає після застосування керуючих дій. За цими даними обчислюється числовий початковий приріст $P(0) = (Y(1) - Y(0)) = X(1) - X(0)$. Наступні обчислення є числовими: обчислюються прирости в послідовні моменти $t = 1, \dots, n$, а стан ситуації визначається із співвідношення:

$$X(t+1) = X(t) + P(t+1).$$

Для інтерпретації прогнозів і видачі результатів експертові проводиться зворотне відображення числових величин в лінгвістичні. При отриманні прогнозу разом з обчисленням вектора $P(t+1)$ обчислюється вектор $C = \{c_1(t+1), \dots, c_n(t+1)\}$. Величина $c_i(t+1)$ - це консонанс чинника f_i . Вектор C змінюється з часом і визначається таким чином. Позначимо через $(t+1)$ максимум позитивних приростів, що поступають на вхід чинника f_i ; тобто $(t+1) = (p_j(t) w_{ji})$, $p_j(t) w_{ji} > 0$. Аналогічно, $(t+1)$ - максимум абсолютних величин негативних приростів, що поступають на вхід чинника f_i ; тобто $(t+1) = (p_j(t) w_{ji})$, $p_j(t) w_{ji} < 0$. Тоді $c_i(t+1) = 0$. Консонанс $c_i(t+1)$ характеризує міру визначеності прогнозу на момент $t+1$. Він дорівнює 1, якщо знаки усіх вхідних приростів однакові, і рівний 0, в іншому випадку. Таким чином, правдоподібний прогноз розвитку ситуації до моменту $t+1$ визначається парою: $X(t+1), C(t+1)$, де $X(t+1)$ - вектор значень чинників ситуації у момент $t+1$, $C(t+1)$ - вектор консонансу в момент $t+1$. Рішення прямої задачі повинне враховувати два істотні моменти.

1. При аналізі нечітких ситуацій нечіткими є і інтервали часу, оскільки час реалізації впливу одних чинників на інші точно невідомий і оцінюється досить грубо. Моменти часу $t+1$ розуміються не як точки на абсолютній часовій шкалі, а як лінійно впорядковані в часі проміжні кроки

прогнозу; цільовий стан $X(t+n)$ не обчислюється ітеративно за формулою $X(t+i)=X(t+i-1)+P(t+i)$, $i = 1, \dots, n$, а є результатом узагальненої якісної оцінки усього прогнозованого розвитку ситуації від t до $t+n$. В алгоритмах рішення використовуються нечіткі матричні операції, звані в нечіткій математиці композиціями [8]: \max - product (роль складання грає узяття максимуму, множення - звичайне) або \max - \min (роль множення грає узяття мінімуму).

2. При обчисленні приростів і станів ситуації в послідовні моменти часу $t, t+1, \dots, t+n$ доводиться обчислювати не лише наступне значення приросту, але і міру упевненості його вибору (консонанс). Тому при виборі позитивного (чи негативного) приросту необхідно зберігати і знехтуваний негативний (чи позитивне) приріст.

3.2. Зворотня задача - це задача знаходження керуючих дій, які дають необхідний приріст значень чинників ситуації. У формулюванні зворотньої задачі, на відміну від прямої, моменти часу не беруть участь. Це пояснюється тим, що неважливо, на якому кроці необхідний приріст буде досягнутий. При пошуку рішення проглядаються шляхи поширення впливів, що мають різну довжину. Для цього використовується нечітке транзитивне замикання $W' = ||w'_{ij}||$ матриці суміжності $W : w'_{ij} = ((w_{ij})_1, (w_{ij})_2, \dots, (w_{ij})_n)$, де елемент $(w_{ij})_k$ матриці W_k , $k = 1, 2, \dots, n$ визначається із співвідношення:

$$(w_{ij})_k = (w_{il}) * (w_{lj})_{k-1}.$$

Точна постановка зворотньої задачі така:

Задані причинно-наслідкові зв'язки між чинниками у вигляді матриці транзитивного замикання W' і цільовий вектор необхідних приростів значень чинників ситуації $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$. Знайти множини векторів вхідних дій $\{U\}$, такі, що для усіх U виконується нерівність $U W' \geq G$.

Рішення зворотньої задачі знаходяться шляхом рішення нечіткого реляційного рівняння $U W' = G$ (1) відносно вектора U . Методи його рішення описані в роботі [9].

Висновки .

Специфіка когнітивного моделювання полягає в тому, що формальні математичні методи аналізу застосовуються до моделей, що описують суб'єктивне бачення ситуації. На кожному етапі формування моделі доводиться приймати рішення, від сукупності яких кінець-кінцем залежить адекватність побудованої моделі.

При виборі НКК треба вирішити, чи береться за основу стандартна модель Коско [3] (що робиться в більшості застосувань) з можливими модифікаціями, або вибирається складніша модель - наприклад, RBFCM. Модель Коско використовує матричні методи і зручна в обчислювальному відношенні; проте вона спирається на однорідність зв'язків, тобто

припускає, що усі впливи обчислюються по одному і тому ж алгоритму. Модель RBFСМ дуже громіздка, проте дозволяє врахувати різний характер впливів на різних зв'язках. Вона може виявитися корисною для невеликих карт. При виборі динамічної моделі доведеться досліджувати питання стійкості впливів.

Важливу роль в побудові когнітивної моделі грає формування набору чинників і зв'язків між ними (включаючи знак зв'язку). Якщо деякі ключові чинники (ядро моделі) увійдуть до набору будь-якого експерта, то "дрібніші" чинники у різних експертів можуть виявитися різними. Приклад з картою на рис. 3, приведений вище, говорить якраз про це.

Лінгвістичні шкали для різних зв'язків в загальному випадку різні. Їх вибір характеризує рівень диференціації різних мір впливу, на які здатний експерт. Крім того, навіть знак зв'язку різні експерти можуть вибрати по-різному.

Представлений в цій роботі огляд різноманітних методів обчислення впливів показує, що різні методи дадуть різні результати. Пропонований в літературі набір моделей і методів аналізу впливів в слабоструктурованих ситуаціях сам по собі не гарантує побудови адекватної моделі. Адекватність остаточно з'ясовується тільки в процесі реальної роботи з моделлю. Звідси, зокрема, витікає, що інформаційні технології підтримки прийняття рішень, засновані на апараті когнітивних карт, повинні бути максимально відкритими для модифікацій. Втім, треба відмітити, що вже сам процес побудови моделі виявляється дуже корисним для аналітиків проблеми ще до початку розрахунків, оскільки він примушує структурувати проблемну область. При формальному виділенні чинників і зв'язків між ними неминуче виявляються раніше невраховані аспекти ситуації, зв'язки, що здавалися несуттєвими, і формується система понять, в термінах якої навіть неформальне обговорення проблеми стає чіткішим і більш обґрунтованим.

Головною позитивною якістю пропонованого апарату когнітивних карт є можливість системного якісного врахування віддалених наслідків рішень, що приймаються, і виявлення побічних ефектів, які можуть перешкодити реалізації, здавалося б, очевидних рішень і які важко оцінити інтуїтивно при великому числі чинників і різноманітні численних шляхів взаємодії між ними. В той же час слід побоюватися завищених очікувань при використанні цього апарату навіть у разі, коли побудована модель визнана адекватною. Результати аналізу, які, як правило, формулюються в термінах лінгвістичних шкал, досить грубі через грубість самих шкал. Вони здатні відбивати основні тенденції впливів, але можуть виявитися ненадійними або даремними, наприклад, при приблизній рівності позитивних і негативних впливів. Індикатором такої ненадійності служать малі значення обчислюваних консонансів.

Підхід, заснований на методиці НКК, є математичною основою для інтелектуальних інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в слабоструктурованих предметних областях.

До аспектів аналізу ситуацій, що є недостатньо пропрацьованими, відносяться методи структуризації ситуацій, тобто побудови когнітивних карт на основі роботи з експертами, методи пояснення отриманих рішень і коригування моделей ситуації за результатами аналізу, а також облік реального часу поширення впливів.

Використані джерела інформації:

1. Axelrod, R., *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites*, Princeton University Press, 1976.
2. Робертс Ф.С., Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. Пер. с англ. М.: Наука, 1986
3. Kosko B., *Fuzzy Cognitive Maps*. //International Journal of Man-Machine Studies, (1986) 24, 65-75.
4. Carvalho J.P. and Tom J.A.B., *Rule Based Fuzzy Cognitive Maps – A comparison with fuzzy Cognitive Maps*. // Proceedings of the NAFIPS99, NY, USA 1999.
5. Кульба В.В., Миронов П.Б., Назаретов В.М. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых орграфов// Автоматика и телемеханика - 1993. - №7.
6. Sawaragi T., Iwai S., Katai O. An integration of qualitative causal knowledge for user-oriented decision support. //Control Theory and Advanced Technology. 1986, v.2, 451-482.
7. Liu Z.-Q., Zhang J.Y. Interrogating the structure of fuzzy cognitive maps. // Soft Computing, 2003, v.7, 148 – 153.
8. Поспелов Д.А.(ред) *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта*. М.: Наука, 1986.
9. Bourke M.M., Fisher D.G.. Solution algorithms for fuzzy relation equations with max-product composition. // Fuzzy Sets and Systems 1998, v.94, 61-69.

Рецензент: д.т.н. Лисенко О.І.