

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЧНИХ ТА МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ

Н.І. НЕДАШКІВСЬКА

Анотація. Запропоновано методологію та системний підхід до підтримання прийняття рішень (ППР) на основі ієрархічних та мережових моделей, який включає методи оцінювання і підвищення узгодженості матриць парних порівнянь (МПП) загального виду, розрахунку нечітких локальних ваг елементів моделі на основі нечітких МПП, обчислення інтервалів довіри для локальних ваг, знаходження агрегованих ваг та функцій довіри до елементів моделі, оцінювання чутливості результатів, а також засоби аналізу ефективності методів, систему моделювання експертного оцінювання та інструментарій у вигляді системи ППР. Пропонована методологія дозволяє підвищувати достовірність розв'язків практичних слабо структурованих задач ППР за рахунок використання більш ефективних методів на кожному з етапів розв'язання задачі. Достовірність результатів застосування методології під час розв'язання практичної задачі ППР може бути оцінена засобами аналізу чутливості на основі індексів стійкості знайдених локальних та глобального ранжувань альтернатив рішень.

Ключові слова: експертні оцінки, нечітка матриця парних порівнянь, неузгодженість, довірчі інтервали, чутливість, стійкість ранжування, система підтримання прийняття рішень, достовірність у методі аналізу ієрархій.

ВСТУП

Роботу присвячено удосконаленню методів аналізу ієрархій та мереж [1, 2], які використовуються для розв'язання слабо структурованих і неструктурованих задач вибору, багатокритеріального та багатоцільового оцінювання альтернатив рішень, розподілу ресурсів, пошуку суттєвих для прийняття рішень факторів, а також оцінювання ризиків та сценаріїв розвитку, передбачення, планування тощо. Методи аналізу ієрархій та мереж застосовуються в багатьох прикладних галузях, зокрема в медицині й охороні здоров'я [3], для оцінювання ефективності функціонування підприємств [4], аналізу проєктів [5], планування випуску нової продукції, у фінансах та банківській справі.

Натепер існують модифікації та узагальнення методів аналізу ієрархій і мереж, спрямовані на подолання обмежень та розширення галузі застосу-

вання таких методів [6–9]. Метод аналізу ієрархій або його складові реалізовано в сучасних комерційних системах підтримання прийняття рішень (СППР) Super Decisions [10], Decision Lens [11], Make It Rational [12] і Logical Decisions [13]. Проте деякі питання залишилися невирішеними. Так, недостатніми виявились: обґрунтованість рівня узгодженості чітких та нечітких експертних оцінок; вивчення та реалізованість у СППР питань щодо оцінювання і підвищення узгодженості нечітких експертних оцінок без участі експерта; формалізованість та реалізованість у СППР методів знаходження локальних і агрегованих ваг на основі нечітких експертних оцінок; урахування в розрахунку локальних ваг невизначеності, що спричинена шкалою та особистими якостями експерта; аналіз чутливості та стійкості результуючого ранжування до змін в оцінках експертів.

Мета роботи — розроблення системного підходу та побудова на його основі СППР, які дозволять підвищити достовірність розв’язків задач підтримання прийняття рішень (ППР) у слабко структурованих і неструктурованих складних системах на основі ієрархічних та мережевих моделей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай задано мережеву модель задачі ППР у вигляді напрямленого графу $S = \{V, L, E, PCM\}$, де V — множина вершин графу, $V = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$, $C_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\}$, $i = 1, \dots, N$ — кластери з елементами задачі ППР, такими як критерії, альтернативи рішень, цілі, політики акторів, сценарії та ін.; L — множина напрямлених ребер графу; E — множина оцінок елементів графу, наданих експертом у шкалі, особисті якості експерта: реаліст, песиміст/оптиміст; PCM — множина обернено симетричних матриць парних порівнянь (ММП) елементів графу.

Необхідно:

- оцінити і підвищити узгодженість МПП загального виду, знайти найбільш неузгоджені експертні оцінки, підвищити узгодженість МПП без участі експерта;
- розрахувати локальні ваги елементів моделі на основі чітких та нечітких МПП;
- розрахувати інтервали довіри для локальних ваг елементів моделі;
- розрахувати агреговані ваги та комбіновані довіри до елементів моделі;
- оцінити чутливість локального та глобального ранжувань елементів моделі.

РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Для розв’язання поставленої задачі розроблено методологію ППР. Вона охоплює всі етапи оцінювання ієрархічних та мережевих моделей ППР від отримання і аналізу вхідної експертної інформації у вигляді обернено симетричних МПП елементів моделі до розрахунку локальних і глобальних ваг елементів моделі та аналізу чутливості отриманих результатів. У межах запропонованої методології розроблено системний підхід до ППР на основі ієрархічних та мережевих моделей (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема системного підходу до ППР на основі ієрархічних та мережових моделей

Метод оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок.

На першому етапі аналізується якість вхідної експертної інформації для елементів мережової моделі, заданої у вигляді обернено симетричних МПП. У роботі пропонується метод оцінювання і підвищення узгодженості МПП загального виду. Нехай X — відкритий інтервал R ; $G = (X, \otimes, \leq)$ — абелева лінійно впорядкована група; e — одиниця у групі G ; $x^{(-1)}$ — елемент, симетричний до $x \in X$ відносно операції \otimes , $D = \{(d_{ij}) \mid i, j = 1, \dots, n\}$ — \otimes -обернено симетрична МПП над групою G . Особливості пропонованого методу оцінювання і підвищення узгодженості \otimes -обернено симетричної МПП D полягають у дослідженні властивості \otimes -слабкої узгодженості та використанні більш ефективних методів пошуку найбільш неузгодженого елемента цієї матриці. Відповідно до методу спочатку перевіряється наявність циклів у МПП. Якщо МПП \otimes -слабко неузгоджена і має цикл, пропонується шукати її найбільш неузгоджений елемент, повернути його експерту для перегляду, або виконати його коригування без участі експерта. Коригування без участі експерта полягає у пошуку нового значення шкали для найбільш неузгодженого елемента $d_{i^*j^*}$, яке забезпечує мінімальне значення показника неузгодженості всієї матриці:

$$d_{i^*j^*} := x^*, d_{j^*i^*} := (x^*)^{-1}, x^* \in Scale;$$

$$x^* = \underset{x \in Scale}{\operatorname{argmin}} \operatorname{ConsInd}(D^{cor}, x),$$

де $\operatorname{ConsInd}(D^{cor}, x)$ — індекс неузгодженості для скоригованої МПП D^{cor} , у якій $d_{ij}^{cor} = d_{ij} \forall i, j$, крім $d_{i^*j^*}^{cor} = x$, $d_{j^*i^*}^{cor} = (x)^{-1}$, $Scale = \{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$.

Після коригування МПП повертається на етап перевірки наявності циклів. Якщо МПП \otimes -слабко узгоджена і не має циклів, розраховується значення показника узгодженості МПП і перевіряється критерій \otimes -допустимої узгодженості. Задоволення цього критерію свідчить про прийнятність якості МПП. Інакше здійснюється перехід на етап коригування, і елементи \otimes -слабко узгодженої МПП ітераційно перераховуються до досягнення матрицею критерію \otimes -допустимої узгодженості. Далі оцінюється ефективність коригування на основі значень норм відхилень скоригованої МПП від початково заданої експертом МПП.

Метод оцінювання і підвищення узгодженості, що пропонується, може застосовуватися до оцінювання і підвищення узгодженості МПП різних видів залежно від конкретної групи G , зокрема мультиплікативних, адитивних та інших МПП. В окремому випадку мультиплікативної групи G аналітично доведено дві теореми, які показують, що з використанням пропонованих методів коригування рівень узгодженості скоригованої МПП не перевищує рівня узгодженості МПП перед коригуванням [14]. Застосування методу оцінювання і підвищення узгодженості дозволяє для всіх елементів мережевої моделі отримати МПП прийнятної якості, які можна використовувати на наступному етапі для знаходження локальних ваг елементів моделі.

Методи розрахунку локальних ваг елементів моделі. В основу методу розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг покладено твердження, що оцінки експерта лише деякою мірою відображають реальні співвідношення між вагами елементів моделі і містять невизначеність незалежно від рівня їх узгодженості [15]. Припускається, що невизначеність оцінок експерта зумовлюється шкалою, у якій експерт виконує оцінювання, і такими особистими його якостями, як реалізм, песимізм та оптимізм. Реалістом називаємо експерта, який надає найближчі до реальних ваг оцінки в шкалі. Оптимістом та песимістом називаємо експертів, оцінки яких незначно (на одну поділку шкали) завищені або занижені порівняно з реальними значеннями. Метод використовує апарат теорії довіри (свідчень) Демпстера–Шейфера і результати комп'ютерного моделювання суджень експерта. Показник невизначеності m_{Θ} оцінок експерта — це значення базової довіри до гіпотези, що всі альтернативи нерозрізнені або мають однакову значущість для експерта.

Відповідно до методу розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг у випадку мультиплікативної МПП $D = \{d_{ij} \mid i, j = 1, \dots, n\}$ спочатку треба розрахувати ненормовані локальні ваги $v_i > 0$ на основі D одним з відомих методів: головного власного вектора, геометричної середньої або іншим і розрахувати показник узгодженості CI МПП D . Після цього задати значення параметра $k_1 \in (0, 1)$ залежно від шкали та особистих якостей експерта, таких як реалізм, песимізм або оптимізм; параметра $k_2 > 0$ — вагового коефіцієнта врахування рівня узгодженості МПП. Довірчий інтервал для локальної ваги альтернативи a_i дорівнює $[Bel_i, Pls_i] = [m_i, m_i + m_{\Theta}]$, де

$$m_i = v_i / \left((1 + k_1(1 + k_2 CI)) \sum_{j=1}^n v_j \right) — \text{значення повної довіри до альтернативи}$$

a_i , яке в цьому випадку збігається зі значенням базової довіри до a_i , $i = 1, \dots, n$; $m_{\ominus} = k_1(1 + k_2CI)/(1 + k_1(1 + k_2CI))$ — значення нормованого показника рівня невизначеності оцінок експерта.

Комп'ютерне моделювання дозволило за деяких умов отримати кількісні оцінки невизначеності суджень експерта — реаліста, песиміста і оптиміста — в задачі обчислення ваг методом парних порівнянь у шкалі Сааті. У результаті на основі розв'язання великої кількості тестових задач різної розмірності побудовано таблиці оцінок параметрів методу для мультиплікативних МПП залежно від кількості порівнюваних елементів [16].

Доведено, що локальна вага альтернативи a_i , розрахована відомим методом аналізу ієрархій [1], міститься у побудованому довірчому інтервалі $[Bel_i, Pls_i] = [m_i, m_i + m_{\ominus}]$, $i = 1, \dots, n$. Результати моделювання показують, що пропонувані довірчі інтервали більш достовірно відображають реальні ваги порівняно з точковими вагами, що отримуються відомим методом аналізу ієрархій, а також нечіткими вагами за методом нечіткої геометричної середньої.

Використання описаного методу знаходження інтервалів довіри до локальних ваг потребує знання вказаних вище якостей експерта. Під час розв'язання практичної задачі пропонується оцінити ці якості експерта, вибрати профіль експерта з множини варіантів на основі ієрархічної моделі, зображеної на рис. 2. До апріорних або евристичних методів оцінювання якості експерта належать методи самооцінювання та взаємного оцінювання (кожний експерт дає оцінку іншим експертам). Апостеріорний метод ґрунтується на використанні інформації про судження експерта в експертизах, проведених з його участю. Розраховується відношення кількості випадків виданих експертом рекомендацій, прийнятність яких підтверджена практикою, до загальної кількості випадків участі експерта у наданні рекомендацій. Вибираючи профіль експерта, також можна аналізувати результати розв'язаних ним тестових задач, відповіді до яких відомі. Наприклад, розглядаються тестові задачі оцінювання експертом площ геометричних фігур, енергетичної цінності продуктів харчування та ін.[17].

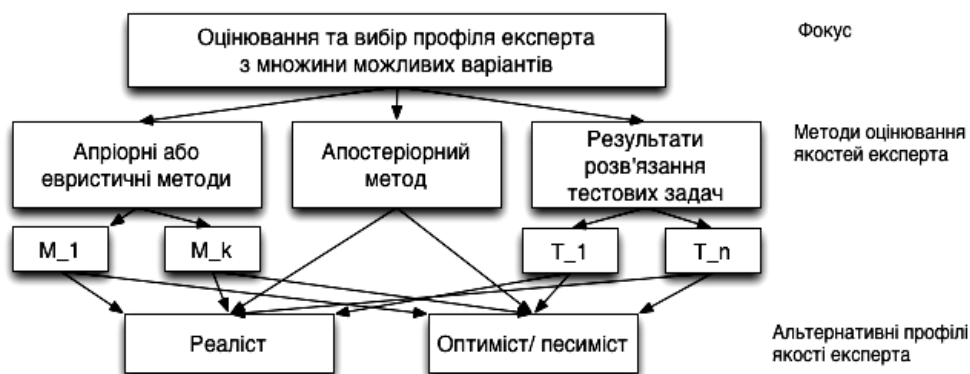


Рис. 2. Базова ієрархічна модель оцінювання якостей експерта

Інший метод полягає у знаходженні нечітких локальних ваг на основі нечітких МПП (НМПП). Він містить етапи оцінювання і підвищення узгодженості НМПП та враховує властивості слабкого і сильного збереження

порядку на множині знайдених нечітких ваг. Пропонований метод, на відміну від існуючих, дозволяє визначити слабку узгодженість НМПП, оцінити допустимість неузгодженості НМПП для обчислення локальних ваг, а також, на відміну від відомих, знаходити найбільш неузгоджені елементи НМПП, використовуючи апарат, розроблений для чітких МПП. Під час використання пропонованого методу не виникає суперечностей, пов'язаних з результатами за чіткою і фазифікованою МПП, на відміну від відомих, які використовують розширені бінарні арифметичні операції. Метод можна застосовувати для оцінювання НМПП із функціями належності будь-якого виду (трапецієподібними, гаусівськими), а також дискретними функціями належності. Властивості слабого і сильного збереження порядку дозволяють в основному виявити цикли і найбільш неузгоджені елементи в слабо неузгоджених НМПП. Коригування цих елементів виключає порушення порядку у результуючих нечітких вагах і тим самим підвищує достовірність отриманих результатів.

Методи оцінювання чутливості результатів. Після розрахунку локальних ваг елементів моделі оцінюється чутливість ранжувань, побудованих на основі цих ваг, до збурень в елементах МПП. Для фіксованого елемента МПП (оцінки експерта) пропонується інтервал стійкості як перетин таких двох: інтервалу, в межах якого може змінюватися цей елемент так, щоб результуюче ранжування залишалось незмінним, та інтервалу, в межах якого може змінюватися цей елемент так, щоб неузгодженість усієї МПП (множини оцінок експерта) залишалася допустимою; уводиться індекс стійкості елемента МПП [18].

Метод розрахунку інтервалів та індексів стійкості для збереження узгодженості та найкращої альтернативи в ранжуванні альтернатив $a_1 \succ a_2 \succ \dots \succ a_n$, коли для розрахунку ваг на основі мультиплікативної МПП використовується метод геометричної середньої, складається з декількох етапів. На першому етапі розраховуються інтервали стійкості $RSInt_{1j} = (\underline{d}_{1j}, \overline{d}_{1j}]$ для оцінки експерта d_{1j} , $j \neq 1$, і $RSInt_{ij} = (\underline{d}_{ij}, \overline{d}_{ij})$ для оцінки експерта d_{ij} , $i \neq j \neq 1$, що зберігають найкращу альтернативу у вказаному ранжуванні, де $\underline{d}_{1j} = \max(L_j^1, L_j^2)$, $\overline{d}_{1j} = 9$, $L_j^1 = d_{1j} \left(\frac{v_j}{v_1} \right)^{n/2}$,

$$L_j^2 = \max_{k \neq j \neq 1} \left(d_{1j} \left(\frac{v_k}{v_1} \right)^n \right), \quad \underline{d}_{ij} = d_{ij} \left(\frac{v_j}{v_1} \right)^n, \quad \overline{d}_{ij} = d_{ij} \left(\frac{v_1}{v_i} \right)^n.$$

Після цього розраховуються інтервали стійкості $CSInt_{ij} = (\underline{\delta}_{ij}(\Delta), \overline{\delta}_{ij}(\Delta)) \quad \forall i, j$, що зберігають узгодженість МПП [19], Визначаються інтервали стійкості $SInt_{ij} = RSInt_{ij} \cap CSInt_{ij} = (\underline{s}_{ij}, \overline{s}_{ij})$ та індекси стійкості $I_{ij} = \min((\underline{s}_{ij})^{-1}, \overline{s}_{ij}) \quad \forall i, j$.

Метод розрахунку інтервалів та індексів стійкості для збереження всього ранжування альтернатив аналогічний до попереднього, за винятком першого етапу, на якому розраховуються інтервали стійкості $(\underline{d}_{kj}, \overline{d}_{kj})$ для оцінок експерта d_{kj} , $k < j$, за яких ранжування альтернатив $a_1 \succ a_2 \succ \dots \succ a_n$

залишається незмінним [18]. Результуючі індекси стійкості дозволяють знайти найбільш чутливі до зміни ранжування та зміни рівня узгодженості експертні оцінки. Комплексний метод оцінювання чутливості агрегованого розв'язку задачі ППР на основі ієрархічної моделі удосконалено шляхом урахування результатів оцінювання чутливості локального ранжування елементів цієї моделі [20].

Розрахунок агрегованих ваг елементів ієрархічної моделі ППР на основі множини взаємозалежних критеріїв рішень. Для цього розроблено модифікацію гібридного методу, запропонованого у праці [21]. Вхідними даними для оцінювання елементів моделі є чіткі та нечіткі експертні оцінки парних порівнянь. Гібридний метод включає методи теорії прийняття рішень, нечітких множин, математичного програмування і статистики, які адаптуються на різних етапах багатокритеріального прийняття рішень залежно від задачі та якості вхідних даних. Модифікація полягає у використанні розроблених більш ефективних методів оцінювання і підвищення узгодженості чітких та нечітких оцінок експерта, а також методу розрахунку нечітких локальних ваг на основі нечітких МПП.

Агреговані за множиною критеріїв функції довіри до локальних ваг альтернатив рішень розраховано за відомими правилами комбінування функцій довіри: Демпстера, Ягера, Жанга, Дюбуа і Прада, правилами дисконтованого та зваженого середнього значення. Проведено оцінювання чутливості результатів, отриманих з використанням вказаних правил комбінування, до змін у множині альтернатив рішень [22]. Досліджено різні види реверсу рангів у випадку додавання або вилучення неоптимальної альтернативи, яка домінується однією або декількома існуючими альтернативами. Визначено дві умови зміни ранжування (реверсу рангів): у першій умові розглядаються зміни ранжувань на основі значень функцій агрегованої повної довіри до груп альтернатив; у другій умові досліджується зміна ранжування між групами альтернатив, спричинена зміною їх довірчих інтервалів.

Аналіз ефективності методів та система моделювання експертного оцінювання. Побудовано систему моделювання експертного оцінювання та використано її для аналізу ефективності пропонуваних і відомих методів оцінювання та підвищення узгодженості МПП без участі експерта, розрахунку інтервалів довіри до локальних ваг, розрахунку нечітких локальних ваг на основі НМПП, а також методів парних порівнянь типу трикутник і лінія.

У підсистемі оцінювання ефективності методу пошуку найбільш неузгодженого елемента МПП [23] спочатку генеруються тестові множини МПП D^* у шкалі Сааті з властивостями слабкої узгодженості і допустимої неузгодженості за показником CR . Далі в кожну МПП D^* уводиться збурення так, щоб результат збурення — МПП D^{dstrb} — була більш неузгоджена і мала цикл. Елемент d_{ij} — найбільш неузгоджений (ННЕ) в D^{dstrb} за побудовою. Із використанням методу, шукається ННЕ $d_{i^*j^*}$ у D^{dstrb} . Після цього МПП D^{dstrb} коригується, змінюючи елемент $d_{i^*j^*}$, знайдений на попередньому кроці, та $d_{j^*i^*}$. Оцінюється ефективність методу, що використовувався на етапі знаходження ННЕ.

Метод називається ефективним, якщо вектор ваг w^{cor} на основі скоригованої МПП D^{dstrb} є ближчим до вектора ваг w^* ніж вектор ваг w^{dstrb} на основі початкової МПП D^{dstrb} до коригування:

$$dist(w^{cor}, w^*) < dist(w^{dstrb}, w^*),$$

де w^* — вектор ваг, близький до вектора реальних ваг, генерується на етапі ініціалізації; $dist$ — функція відстані. Наприклад, функція кутової відстані

може використовуватися для аналізу МПП: $dist(x, y) = \left\| \frac{x}{\|x\|_2} - \frac{y}{\|y\|_2} \right\|_2$.

Оцінки ефективності [23] методів пошуку ННЕ МПП свідчать про те, що пропонувані методи *Transitiv* і *MOutflow* приводять до більш достовірних результатів порівняно з іншими відомими методами *CI*, *Corr* [24] і *Outflow* [25].

Результати аналізу показують, що використання відомих показників узгодженості CR [1], HCR [26], CI^{tr} [27] і k_y [28], а також методів оцінювання узгодженості [1, 28] має декілька обмежень. Зокрема, вказані показники та методи оцінювання узгодженості можуть привести до різних висновків щодо допустимої неузгодженості МПП. Установлено, що допустимість неузгодженості МПП на основі відомих методів не гарантує збіжності ранжувань альтернатив, отриманих різними методами парних порівнянь. Тому ранжування може залишатися невизначеним.

Істотне обмеження відомих методів оцінювання узгодженості [1, 28] полягає в тому, що вони не ідентифікують порушення порядкової транзитивності або цикл у МПП. Наявність циклу в МПП означає, що не існує ранжування елементів, яке задовольняє всі елементи цієї матриці. Проте для ряду тестових задач отримано, що методи [1, 28] визнають МПП з циклом допустимо неузгодженими і придатними для надійного розрахунку локальних ваг на їх основі. Пропонований метод оцінювання і підвищення узгодженості виявляє та коригує цикл у МПП і тому більш ефективний порівняно з відомими [1, 28].

Ефективність пропонуваних методів підвищення узгодженості МПП залежить від відсотка помилкових елементів МПП, які є значними збуреннями реальних значень [29]. Цей відсоток можна оцінити, використовуючи розроблений метод *Transitiv*.

Результати моделювання показують, що в абсолютній більшості тестових задач ранжування альтернатив, отримані різними методами на основі МПП, неузгодженість яких оцінена і скоригована пропонуваним методом, збігаються. Це підтверджує достовірність ранжувань, отриманих на основі МПП.

Система підтримання прийняття рішень на основі ієрархічних та мережевих моделей. На базі розроблених моделей і методів побудовано інструментарій у вигляді СППР (рис. 3, 4).

Функціональні можливості системи включають: задання моделей різноманітної структури; редагування моделі в зручному графічному режимі; використання як статистичних і експертних оцінок парних порівнянь вхідних даних та безпосередньо у вигляді числових значень; введення даних як вручну, так і їх завантаження із зовнішніх джерел, використання шаблонів моделей; отримання результатів на основі чітких і нечітких оцінок експер-

тів, а також неповної множини експертних оцінок; визначення найбільш неузгоджених або суперечливих оцінок експертів, циклів у множині оцінок, їх коригування з участю і без участі експерта; використання різних методів обчислення локальних ваг елементів моделі; урахування факторів ризику в оцінюванні альтернатив рішень; оброблення оцінок групи експертів з урахуванням їх компетентності; використання різних методів обчислення агрегованих ваг елементів моделі; оцінювання чутливості та стійкості отриманих результатів.

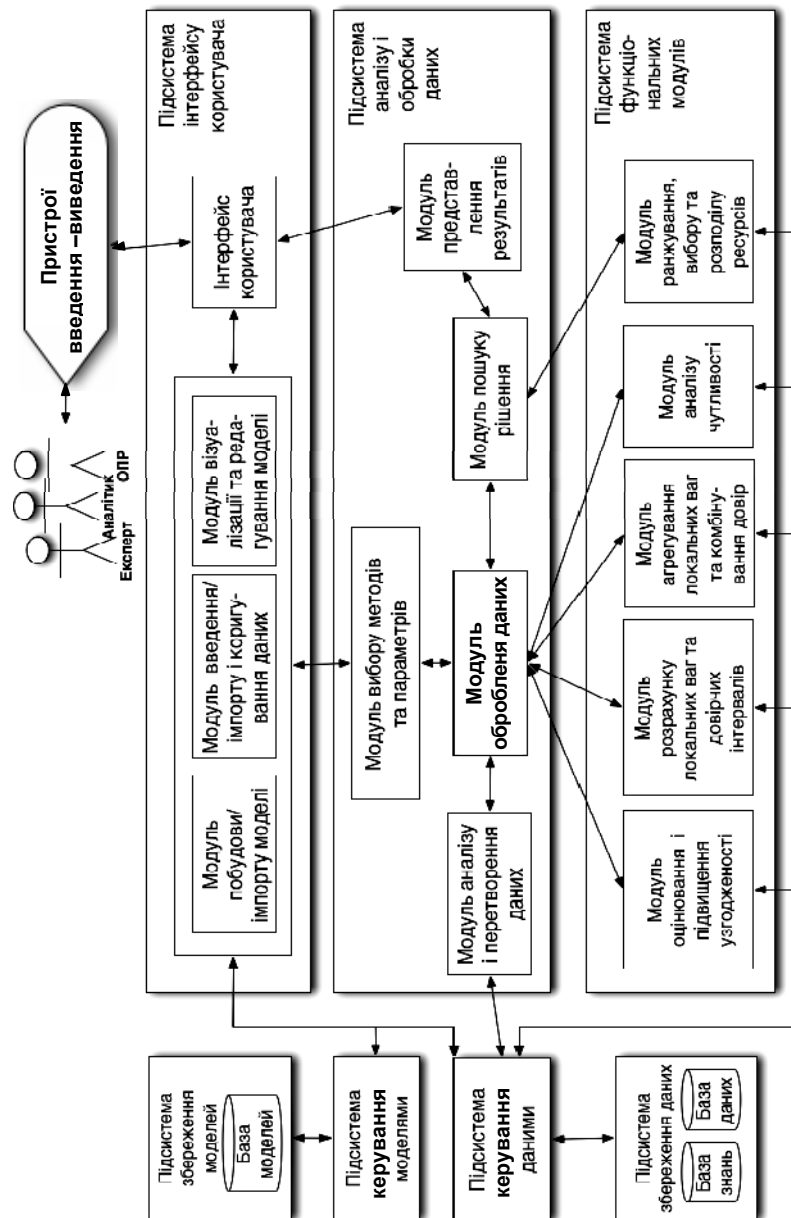


Рис. 3. Архітектура СПСР: ОПР — особа, яка приймає рішення

Підсистема інтерфейсу користувача містить декілька модулів уведення даних, дозволяє створити, зобразити, редагувати у графічному інтерфейсі користувача та імпортувати з файлу модель задачі. Доступні такі шаблони моделей: повна або неповна ієрархія, повна або неповна ієрархія з петлями

та мережева структура. У модулі введення даних для побудованої моделі вводяться статистичні дані — характеристики альтернатив рішень за кількісними критеріями/цілям, та якісні дані у вигляді експертних оцінок елементів моделі. Дані вводяться як у графічному інтерфейсі користувача, так і за допомогою імпорту з файлів.

У підсистемі аналізу і оброблення даних виконується розрахунок побудованої моделі відповідно до розробленої методології та системного підходу до ППР (рис. 1, 4). Для реалізації окремих етапів ППР застосовуються відповідні модулі, які входять до складу підсистеми функціональних модулів. Достатність обсягу введених даних для оброблення моделі та коректність цих даних перевіряються в модулі попереднього аналізу і трансформації, у якому відбувається також перетворення даних для використання окремими методами оброблення. Відокремлення підсистем керування даними та моделями від підсистем збереження даних і моделей дозволяє побудувати систему, незалежну від архітектури зберігання даних, та виконувати ефективний обмін даними між усіма елементами СППР [30].

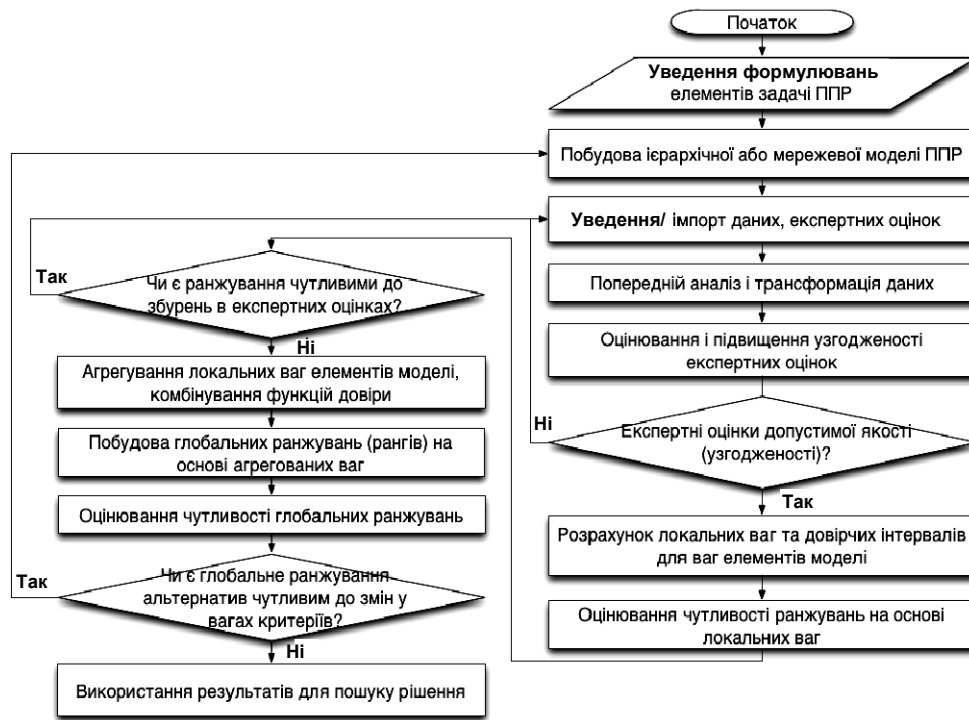


Рис. 4. Функціональна схема СППР

Підсистеми аналізу, оброблення даних та функціональних модулів СППР реалізовані в середовищі Python 3. Характеристики і переваги цього інструментарію: крос-платформеність, відносна простота використання, наявність великої кількості бібліотек з реалізованими математичними функціями роботи з матрицями та розв’язання задач оптимізації, сучасний рівень побудови інформаційної системи, програмне забезпечення з відкритим кодом (opensource). Для збереження моделей розроблено власний формат даних .ahr на основі відомого текстового формату обміну даними JavaScript Object Notation. Формат JSON вважається більш лаконічним порівняно з XML і більш придатними для серіалізації складних структур.

Побудований інструментарій використано для розв'язання декількох практичних задач на замовлення Міністерств і відомств України.

ВИСНОВОК

У роботі розроблено системний підхід, методологію ППР, а також систему підтримання прийняття рішень на основі ієрархічних та мережевих моделей, які дають змогу підвищити достовірність розв'язків задач підтримання прийняття рішень у слабо структурованих і неструктурованих складних системах. Пропоновані системний підхід та методологія включають такі методи, розроблені автором: оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок, розрахунок інтервалів довіри до локальних ваг та нечітких локальних ваг елементів моделі на основі нечітких експертних оцінок, знаходження агрегованих ваг та агрегованих функцій довіри до елементів моделі, а також метод комплексного аналізу чутливості отриманих результатів. Розроблено систему моделювання експертного оцінювання, за її допомогою отримано оцінки ефективності пропонованих та відомих методів. Побудований інструментарій у вигляді СППР може використовуватися для розв'язання практичних задач вибору, розподілу ресурсів, оцінювання ризиків, сценаріїв розвитку, передбачення, планування тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т.Л. Саати. — 2-е изд. — М.: Книжн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 360 с.
2. Панкратова Н.Д. Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування: навч. посіб. / Н.Д. Панкратова, Н.І. Недашківська. — К: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2010. — 371 с.
3. Vidaletal L.-A. Applying AHP to select drugs to be produced by anticipation in a chemotherapy compounding unit / L.-A. Vidaletal // Expert Systems with Applications. — Vol. 37. — 2010. — P. 1528–1534.
4. Kumar A. Analyzing customer preference and measuring relative efficiency in telecom sector: A hybrid fuzzy AHP/DEA study / A. Kumar, R. Shankar, R.M. Debnath // Telematics and Informatics. — Vol. 32, Issue 3. — 2015. — P. 447–462.
5. Garbuzova-Schlifter M. AHP-based risk analysis of energy performance contracting projects in Russia / Maria Garbuzova-Schlifter, Reinhard Madlener // Energy Policy. — Vol. 97. — 2016. — P. 559–581.
6. Krejčí Jana. Fuzzy eigenvector method for obtaining normalized fuzzy weights from fuzzy pairwise comparison matrices / Jana Krejčí // Fuzzy Sets and Systems. — Vol. 315. — 2017. — P. 26–43.
7. Koczkodaj W.W. Pairwise comparisons simplified / W.W. Koczkodaj, J. Szybowski // Applied Mathematics and Computation. — Vol. 253. — 2015. — P. 387–394.
8. Bozóki S. An application of incomplete pairwise comparison matrices for ranking top tennis players / Sándor Bozóki. // European Journal of Operational Research. — Vol. 248, Issue 1. — 2016. — P. 211–218.
9. Benítez J. Improving consistency in AHP decision-making processes / J. Benítez et al. // Applied Mathematics and Computation. — Vol. 219, Issue 5. — 2012. — P. 2432–2441.
10. Система підтримання прийняття рішень SuperDecisions. — Available at: <http://www.superdecisions.com>
11. Система підтримання прийняття рішень DecisionLens. — Available at: <http://www.decisionlens.com>
12. Система підтримання прийняття рішень MakeItRational. — Available at: <http://makeitrational.com/>, <http://www.transparentchoice.com/>

13. Система підтримання прийняття рішень LogicalDecisions. — Available at: <http://www.logicaldecisions.com/>
14. Недашківська Н.І. Метод узгоджених парних порівнянь при оцінюванні альтернатив рішень за якісним критерієм / Н.І. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2013. — №4. — С. 67–79.
15. Nedashkovskaya N.I. Method for Evaluation of the Uncertainty of the Paired Comparisons Expert Judgements when Calculating the Decision Alternatives Weights / I. Nedashkovskaya // Journal of Automation and Information Sciences. — 2015. — Vol. 47, Issue 10. — P.69–82.
16. Недашківська Н.І. Построение доверительных интервалов для весов альтернатив решений на основе экспертных парных сравнений / Н.И. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — №3. — С. 121–130.
17. Saaty Thomas L. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process / Thomas L. Saaty, Liem T. Tran // Mathematical and Computer Modelling. — Vol. 46, Issues 7–8. — 2007. — P. 962–975.
18. Недашківська Н.І. Оцінювання стійкості локальних ваг альтернатив рішень на основі методу парних порівнянь / Н.І. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — №4. — С. 14–22.
19. Aguarón J. Consistency stability intervals for a judgement in AHP decision support systems / Juan Aguarón, María Teresa Escobar, José Maria Moreno-Jiménez // European J. of Operational Research. — Vol. 145, Issue 2. — 2003. — P. 382–393.
20. Pankratova N. Sensitivity analysis of a decision-making problem using the Analytic Hierarchy Process / N. Pankratova, N. Nedashkovskaya // International Journal «Information Theories and Applications». — 2016. — Vol. 23, N 3. — P. 232–251.
21. Pankratova N.D. Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives / N.D. Pankratova and N.I. Nedashkovskaya // Cybernetics and Systems Analysis. — 2014. — Vol. 50 (5). — P. 701–711.
22. Pankratova N. Estimation of Sensitivity of the DS/AHP Method While Solving Foresight Problems with Incomplete Data / N. Pankratova, N. Nedashkovskaya // Intelligent Control and Automation. — 2013. — Vol. 4, N 1. — P. 80–86.
23. Nedashkovskaya N. Investigation of methods for improving consistency of a pairwise comparison matrix / N. Nedashkovskaya // Journal of the Operational Research Society. — Published online: 02 Feb 2018.
24. Lipovetsky S. Robust estimation of priorities in the AHP / S. Lipovetsky, W.M. Conklin // European Journal of Operational Research. — Vol. 137 (1). — 2002. — P. 110–122.
25. Siraj S. A heuristic method to rectify intransitive judgments in pairwise comparison matrices / S. Siraj, L. Mikhailov, J. Keane // European Journal of Operational Research. — Vol. 216 (2). — 2012. — P. 420–428.
26. Stein William E. The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process / William E. Stein, Philip J. Mizzi // European Journal of Operational Research. — Volume 177, Issue 1. — 2007. — P. 488–497.
27. Peláez J.I. A new measure of consistency for positive reciprocal matrices / J.I. Peláez, M.T. Lamata // Computer and Mathematics with Applications. — Vol. 46 (12). — 2003. — P. 1839–1845.
28. Тоценко В.Г. Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект / В.Г. Тоценко. — К.: Наук. думка, 2002. — 381 с.
29. Pankratova N. Methods of evaluation and improvement of consistency of expert pairwise comparison judgements / N. Pankratova, N. Nedashkovskaya // International Journal «Information Theories and Applications». — 2015. — Vol. 22, N 3. — P.203–223.
30. Бідюк П.І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень: навч. посіб. / П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніюк. — К.: ННК «ІІСА» НТУУ «КПІ», 2010. — 340 с.

Надійшла 16.01.2018