DOI: 10.20535/kpisn.2020.4.226981
УДК 519.816, 681.518.2

Н.І. Недашківська*
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
*corresponding author: n.nedashkivska@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ ЧУТЛИВОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАВОК НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЧНОЇ ТА МЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛЕЙ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Проблематика. Прогнозування майбутніх продажів необхідне для контролю потоку товарів у ланцюгах поставок (ЛП), тому фірми виконують прогнозування споживчого попиту. Для дослідження достовірності розв'язку виконують аналіз чутливості (АЧ) результатів до змін у початкових даних. Мережеві моделі підтримки прийняття рішень (ППР) зазвичай містять дуже велику кількість елементів і зв'язків між ними, що ускладнює виконання АЧ.

Мета дослідження. Оцінити чутливість розв'язку, який задано у вигляді ранжування елементів мережевої моделі ППР, до неточностей і протиріч в елементах експертних матриць парних порівнянь (МПП) і до зміни окремих елементів суперматриці мережевої моделі ППР. Визначити пріоритетність різних типів інформації в системі управління (СУ) ЛП й визначити чутливість розв'язку для отримання більш точного прогнозу споживчого попиту.

Методика реалізації. Оцінювання моделей ППР для системного визначення пріоритетності інформаційної потреби в СУ ЛП здійснюється на основі розвиненого методу аналізу мереж. Метод оцінювання чутливості розв'язку, який пропонується для ієрархічної моделі ППР, включає знаходження стійких елементів кожного рівня ієрархії та оцінку ступеня чутливості глобального ранжування елементів. Чутливість розв'язку на основі мережевої моделі включає оцінку стійкості локальних ранжувань, знаходження елементів матриці, які найсуттєвіше впливають на зміну узгодженості та зміну локального ранжування, а також чутливість до зміни окремих елементів суперматриці моделі.

Результати дослідження. Набув подальшого розвитку метод комплексного оцінювання чутливості, удосконалено етапи оцінювання стійкості локального ранжування елементів мережевої моделі ППР і стійкості елементів матриці до зміни допустимої неузгодженості. Узагальнено метод АЧ результатів на основі мережевої моделі ППР до зміни окремих елементів суперматриці з використанням засобів машинного навчання.

Висновки. В задачі управління ЛП знайдено елементи експертної МПП, які найбільше впливають на зміну узгодженості та зміну ранжувань альтернатив рішень. Розраховано стійкі елементи матриці та елементи для перегляду експертом задля підвищення достовірності розв'язку задачі управління ЛП на основі ієрархічної та мережевої моделей ППР.

Ключові слова: управління ланцюгами поставок; ієрархічна модель; мережева модель; багатокритеріальний аналіз; підтримка прийняття рішень; експертні оцінки; матриця парних порівнянь; чутливість рішення; стійкість рішення.

Вступ

В [1] розглянуто побудову ієрархічної моделі підтримки прийняття рішень (ППР) для багатокритеріального аналізу пріоритетності інформаційної потреби в системі управління (СУ) ланцюгом поставок (ЛП). У цій же роботі запропоновано алгоритм розрахунку агрегованих за множиною критеріїв рішень величин відносної важливості, пріоритетності дев'яти типів інформації для прогнозування попиту в сучасних системах управління ЛП із використанням думок учасників ЛП, проведено оцінювання якості експертних думок.

ЛП охоплює виробничий процес від постачальників до кінцевих замовників і містить постійне забезпечення руху інформації між усіма учасниками цього процесу. За такої умови обмін інформацією в режимі реального часу та формування узгодженого рішення всіма учасниками процесу вважаються одним із чинників ефективного управління.

Для дослідження достовірності розв'язку задачі багатокритеріального аналізу, отриманого на основі моделі ППР, доцільно визначити залежність між розв'язком і збуреннями в початкових даних – експертних оцінках. Ця задача належить до аналізу чутливості (АЧ) результатів до змін у початкових даних. Використання АЧ дає змогу краще зрозуміти досліджувану проблему, виявити взаємозв'язки з іншими подібними ситуаціями, перевірити обґрунтованість отриманих числових значень і необхідність у більш високій точності обчислень.

У [2–6] розроблено складові комплексного АЧ і стійкості розв'язку для ієрархічних моделей ППР. Досліджено стійкість результуючого глобального ранжування альтернатив рішень при варіюванні: початкових даних – оцінок експертів [3]; параметрів моделі, зокрема ваг критеріїв [2, 4]; структури моделі, а саме при додаванні чи вилученні альтернатив або критеріїв рішень [6]. Питання чутливості та стійкості результатів, отриманих на основі ієрархічної моделі ППР і методами парних порівнянь, досліджено також у роботах [7–14]. Чутливість і стійкість результатів мережевої моделі ППР вивчалися в [15].

Розглянемо мережеву модель задачі ППР як спрямований граф $S\_model = \{V, L, E, PCM\}$, де S – множина вершин графа, представлених кластерами з критеріями, альтернативами рішень, цілями, політиками акторів, сценаріями та іншими елементами задачі ППР:

$$S = \{C_1, C_2, ..., C_N\},\ C_i = \{v_{i1}, ..., v_{in_i}\};$$

L – множина орієнтовних ребер графа; E – множина експертних оцінок елементів графа в шкалі; PCM – множина обернено симетричних матриць парних порівнянь (МПП) на основі заданих експертом оцінок E елементів графа.

Актуальним є оцінювання чутливості розв'язку, який задано як ранжування елементів мережевої моделі ППР, до неточностей і протиріч в елементах МПП.

Постановка задачі

Знайти елементи МПП у задачі управління ЛП, які найсуттєвіше впливають на зміну узгодженості цієї матриці та зміну локального ранжування альтернатив рішень, розрахувати стійкі елементи матриці та елементи для перегляду задля підвищення достовірності розв'язку.

Короткий опис методів підтримки прийняття рішень на основі мережевої моделі

Один із методів ППР, який нині розвивається, – це метод аналітичних ієрархій [16, 17] і його узагальнення – метод мереж [18–20]. Метод аналізу ієрархій полягає у структуризації складної проблеми ППР як ієрархічної моделі критеріїв і цілей рішень із подальшим оцінюванням елементів цієї моделі з використанням кількісної інформації та суджень експертів.

Проте не всі задачі ППР подаються як ієрархії, оскільки можуть траплятися залежності елементів вищих рівнів (критеріїв) від елементів нижчих рівнів (альтернатив рішень). Також виникають взаємні залежності між елементами одного рівня ієрархії. У методі аналізу мереж (МАМ) [18–20] альтернативи рішень оцінюються на основі моделі, яка містить будь-які зворотні зв'язки між елементами, а також петлі.

Розвинення МАМ полягає у використанні методу оцінювання та підвищенні узгодженості МПП загального вигляду. Розвинений МАМ складається з семи етапів.

Е т а п 1. Сформувати мережу $S = \{C_1, C_2, ..., C_N\}$ елементів задачі ППР, де кластер C_i містить n_i елементів: $C_i = \{v_{i1}, ..., v_{in_i}\}$, $i = 1, ..., N$. Для $C_i, C_j \in S$ задаються значення функціоналу впливу $I : S \times S \to \{0,1\}$:

$$I(C_i, C_j) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } C_j \text{ залежить від } C_i, \\ 0 \text{ в іншому випадку.} \end{cases}$$

Е т а п 2. Для фіксованого кластера C_i, $i = 1, ..., N$, знайти множину кластерів $\{C_j\}$, які залежать від C_i, тобто для яких виконується $I(C_i, C_j) = 1$. Нехай N_i^{cl} – кількість таких кластерів C_j для фіксованого C_i.

Для множини $\{C_j\}$, $j = 1, ..., N_i^{cl}$ побудувати:

– МПП кластерів C_j відносно кластера C_i:

$$M_i^{cl} = \{(m_{i,j_1,j_2}^{cl}) \mid j_1, j_2 = 1, ..., N_i^{cl}\},$$

– МПП елементів кластера C_j відносно p-го елемента кластера C_i:

$$M_{ijp}^{el} = \{(m_{ijpqr}^{el}) \mid q, r = 1, ..., n_j\},$$

$i = 1, ..., N$, $j = 1, ..., N_i^{cl}$, $p = 1, ..., n_i$.

Е т а п 3. Оцінити та за необхідності підвищити узгодженість усіх МПП, побудованих на етапі 2. Метод може застосовуватися до адитивних, мультиплікативних, нечітких й інших видів МПП [21]. Унаслідок застосування цього методу оцінювання та підвищення узгодженості отримуються МПП прийнятної якості для всіх елементів мережевої моделі ППР. Далі МПП можуть використовуватися для розрахунку локальних ваг елементів моделі.

Е т а п 4. Для кожного кластера C_i, $i = 1,\dots,N$ знайти вектори локальних ваг:

$$w_i^{cl} = \{(w_{ij}^{cl}) \mid j = 1,\dots,N_i^{cl}\},$$

де w_{ij}^{cl} – вага кластера C_j відносно кластера C_i, та

$$w_{ijp}^{el} = \{(w_{ijpq}^{el}) \mid q = 1,\dots,n_j\},$$

де w_{ijpq}^{el} – вага q-го елемента кластера C_j відносно p-го елемента кластера C_i, $j = 1,\dots,N_i^{cl}$.

Ваги w_{ij}^{cl} і w_{ijpq}^{el} розраховуються на основі МПП M_i^{cl} і M_{ijp}^{el} відповідно залежно від властивостей цих матриць. Для чітких МПП використовуються методи EM, RGMM або AN парних порівнянь. Вектори ваг нормуються до одиниці.

Е т а п 5. Для кластерів $C_i, C_j \in S$, що задовольняють $I(C_i, C_j) = 1$, побудувати блочну матрицю ваг елементів

$$WE = \{(WE_{ji}) \mid j,i = 1,\dots,N\},$$

де $WE_{ji} = \{(w_{ijpq}^{el}) \mid p = 1,\dots,n_i,\ q = 1,\dots,n_j\}$.

У матриці WE_{ji} містяться розраховані на попередньому етапі локальні ваги w_{ijpq}^{el} елементів кластера C_j відносно елементів кластера C_i.

У випадку, коли кластер C_j не залежить від C_i, тобто $I(C_i, C_j) = 0$, відповідний блок у матриці WE буде нульовим: $WE_{ji} = 0$.

Для кластерів $C_i, C_j \in S$, які задовольняють умову $I(C_i, C_j) = 1$, також формується матриця ваг кластерів $WC = \{(WC_{ji}) \mid j,i = 1,\dots,N\}$, де $WC_{ji} = w_{ij}^{cl}$ – вага кластера C_j відносно кластера C_i. Якщо кластер C_j не залежить від C_i, то $WC_{ji} = 0$.

Е т а п 6. Виконати агрегування локальних ваг елементів кластерів. Для цього побудувати зважену блочну матрицю ваг елементів – суперматрицю задачі

$$WWE = \{(WWE_{ji}) \mid j,i = 1,\dots,N\},$$

де $WWE_{ji} = WE_{ji} \cdot WC_{ji}$ або

$$WWE_{ji} = \{(w_{ijpq}^{el} \cdot w_{ij}^{cl}) \mid p = 1,\dots,n_i,\ q = 1,\dots,n_j\}.$$

Суперматриця містить зважені ваги всіх елементів усіх кластерів моделі відносно елементів кластерів моделі. Суперматриця є квадратною, її розмірність дорівнює $(\sum_i n_i) \times (\sum_i n_i)$, де n_i – кількість елементів у кластері C_i. За будовою суперматриця невід'ємна і стохастична за стовпчиками.

Агреговані пріоритети елементів кластерів розраховуються на основі суперматриці WWE залежно від властивостей незвідності та примітивності цієї матриці.

Якщо WWE – примітивна, то шукані агреговані пріоритети w обчислюються внаслідок граничного переходу $\lim_{k\to\infty} WWE^k = we^T$, називаються *граничними вагами* та є елементами головного власного вектора матриці WWE.

Якщо WWE – незвідна, імпримітивна (циклічна), то шукані агреговані пріоритети обчислюються усередненням значень стовпців матриці WWE^k при $k \to \infty$.

Е т а п 7. Нормувати агреговані ваги альтернатив.

Розвинений метод комплексного оцінювання чутливості результатів на основі ієрархічної моделі підтримки прийняття рішень

Елементи методу комплексного оцінювання чутливості глобального ранжування на основі ієрархічної моделі ППР було запропоновано в [2]. У роботах [3, 4] цей метод удосконалено включенням додаткових етапів розрахунку інтервалів стійкості експертних оцінок парних порівнянь, у межах яких зміни оцінок зберігають найкращу альтернативу, все ранжування альтернатив, а також допустиму неузгодженість множини оцінок.

Нехай H – ієрархія, яка має $p+1$ рівень. Кількість елементів L_k-го рівня позначимо N_{L_k}, $L_k \in [L_0, L_p]$. Нехай $D_r^{L_k L_{k-1}}$ – МПП елементів L_k-го рівня ієрархії відносно r-го елемента L_{k-1}-го рівня, $r \in [1, N_{L_{k-1}}]$; $\hat{w}_{lr}^{L_k L_{k-1}}$ – локальна вага l-го елемента L_k-го рівня відносно r-го елемента L_{k-1}-го рівня, $l \in [1, N_{L_k}]$, $r \in [1, N_{L_{k-1}}]$. Глобальні ваги елементів L_k-го рівня ієрархії позначимо $\hat{w}_l^{L_k}$, $l \in [1, N_{L_k}]$. Глобальні ваги обчислюються на основі локальних ваг $\hat{w}_{lr}^{L_k L_{k-1}}$ із використанням принципу ієрархічної композиції. Результат методу ієрархій – це глобальні ваги $\hat{w}^{L_p} = \{\hat{w}_i^{L_p} \mid i \in [1, N_{L_p}]\}$ елементів останнього рівня моделі, альтернатив рішень.

Розглянемо етапи розвиненого методу оцінювання чутливості розв'язку, отриманого на основі ієрархічної моделі ППР:

- знайти стійкі елементи кожного рівня ієрархічної моделі ППР;
- оцінити ступінь чутливості глобального ранжування елементів останнього рівня ієрархічної моделі до зміни ваг елементів ієрархії.

Оцінка стійкості локального ранжування елементів мережевої моделі підтримки прийняття рішень на основі вектора $\hat{w}_{lr}^{L_k L_{k-1}}$ до змін в елементах матриці парних порівнянь

Нехай $a_1 \succ a_2 \succ ... \succ a_n$ – локальне ранжування об'єктів на основі вектора $\hat{w}_{lr}^{L_k L_{k-1}}$ локальних ваг цих об'єктів.

Інтервал стійкості для елемента експертної МПП RSInt – це інтервал, у межах якого елемент МПП може змінюватися так, щоб локальне ранжування альтернатив залишалося незмінним [3].

Метод оцінювання стійкості складається з п'яти етапів.

Етап 1. Знайти інтервали стійкості $RSInt_{1j} = (\underline{d_{1j}}, \overline{d_{1j}})$, $j \neq 1$, і $RSInt_{kj} = (\underline{d_{kj}}, \overline{d_{kj}})$, $k \neq j \neq 1$, які зберігають найкращу альтернативу, а також інтервали стійкості $RSInt_{kj}^{all\ rank} = (\underline{d_{kj}}, \overline{d_{kj}})$, $k < j$, які зберігають усе ранжування альтернатив.

Етап 2. Знайти інтервали стійкості $CSInt_{ij}(\Delta) = (\underline{\delta_{ij}}(\Delta), \overline{\delta_{ij}}(\Delta))$, $i, j = 1,...,n$, за яких зберігається допустима неузгодженість МПП, де $\Delta = IУ^{\text{поріг}} - IУ(D) > 0$, $IУ^{\text{поріг}} = IУ^{\text{поріг}}(n)$ – порогове значення індексу узгодженості ($IУ$), $IУ(D)$ – значення $IУ$ для МПП D.

Етап 3. Розрахувати інтервали стійкості $SInt_{ij} = RSInt_{ij} \cap CSInt_{ij}$, $i, j = 1,...,n$, які забезпечують збереження найкращої альтернативи та зберігають допустиму неузгодженість МПП.

Етап 4. Розрахувати інтервали стійкості $SInt_{ij}^{all\ rank} = RSInt_{ij}^{all\ rank} \cap CSInt_{ij}$, $i, j = 1,...,n$, які забезпечують збереження всього ранжування та зберігають допустиму неузгодженість МПП.

Етап 5. Розрахувати результуючі індекси стійкості

$$\delta_{ij} = \min((\underline{SInt_{ij}})^{-1}, \overline{SInt_{ij}})$$

і $\delta_{ij}^{all\ rank} = \min((\underline{SInt_{ij}^{all\ rank}})^{-1}, \overline{SInt_{ij}^{all\ rank}})$, $i, j = 1,...,n$.

Для випадку, коли локальні ваги розраховуються за методом RGMM, у [3] знайдено розрахункові формули для інтервалів стійкості

$$RSInt_{1j} = (\underline{d_{1j}}, \overline{d_{1j}}),\ j \neq 1,\ RSInt_{kj} = (\underline{d_{kj}}, \overline{d_{kj}}),$$

$$k \neq j \neq 1,\ RSInt_{kj}^{all\ rank} = (\underline{d_{kj}}, \overline{d_{kj}}),\ k < j.$$

Інтервали $CSInt_{ij}(\Delta) = (\underline{\delta_{ij}}(\Delta), \overline{\delta_{ij}}(\Delta))$ стійкості експертних оцінок щодо збереження узгодженості розраховуються відповідно до [9].

Зафіксуємо МПП $D_r^{L_k L_{k-1}}$. *Елемент* МПП $D_r^{L_k L_{k-1}}$*, який найсуттєвіше впливає на зміну локального ранжування альтернатив* рішень – той, що характеризується найменшим значенням індексу стійкості [3]:

$$I_{ij} = \min((\underline{RSInt_{ij}})^{-1}, \overline{RSInt_{ij}}),$$

де $\underline{RSInt_{ij}}$ і $\overline{RSInt_{ij}}$ – границі інтервалу стійкості $RSInt$, $i, j = 1,...,n$.

Елемент МПП $D_r^{L_k L_{k-1}}$*, який найсуттєвіше впливає на зміну рівня неузгодженості всієї матриці МПП* – той, що характеризується найменшим значенням індексу стійкості [9]:

$$I_{ij} = \min((\underline{CSInt_{ij}})^{-1}, \overline{CSInt_{ij}}),$$

де $\underline{CSInt_{ij}}$ і $\overline{CSInt_{ij}}$ – границі інтервалу стійкості $CSInt$, $i, j = 1,...,n$.

Індекс стійкості критерія c_l в ієрархічній моделі ППР *у сенсі зміни глобального ранжування* альтернатив рішень:

$$SensVal(c_l) = \min_{i<j}(|\ \delta_{i,j,l}\ |),$$

де $\delta_{i,j,l}$ – величина відносної зміни глобальної ваги елемента c_l, за якої є зміна глобального ранжування між альтернативами a_i і a_j, $i,j = 1,...,n$, $l = 1,...,m$. Величини $\delta_{i,j,l}$ розраховуються відповідно до [2, 4].

Елемент L_k-го рівня ієрархії, який найбільше впливає на зміну глобального ранжування альтернатив, має найменше значення індексу стійкості $SensVal(c_l)$.

Індекс стійкості i-ї альтернативи відносно *r*-го елемента L_{p-1}-го рівня:

$$C_{ir}^a = \min_{j\in[1,N_{L_p}],\ j\neq i}(|\,\delta_{i,j,l}^a\,|)\,.$$

Альтернатива, яка найсуттєвіше впливає на зміну глобального ранжування альтернатив, має найменше значення індексу C_{ir}^a для всіх $i \in [1, N_{L_p}]$, $r \in [1, N_{L_{p-1}}]$.

Оцінювання чутливості результатів на основі мережевої моделі підтримки прийняття рішень до зміни окремих елементів суперматриці

В [15] аналіз стійкості розв'язку на основі методу мереж полягає в побудові простору збурень через емпіричне збурення окремих елементів у рядках суперматриці. Різні області цього простору пов'язуються з різними альтернативами. Суперматриця може містити велику кількість елементів. Тому збурення окремо взятого її елементу може не привести до помітних змін у ранжируванні альтернатив. Там само досліджується випадок зміни всіх елементів рядка суперматриці, що дасть змогу дослідити, як один елемент мережі одночасно впливає на всі інші її елементи.

Нехай $W = \{w_{ij}\}$ – суперматриця задачі, $i,j = \sum_i n_i$. Розглядається простір *X* матриць, які є збуреннями матриці *W*. Збурення виконується так, щоб зберегти стохастичність за стовпчиками та пропорційність елементів незбуреної матриці. Елементи матриці W задовольняють $w_{ij} \in [0,1]$, тому збурене значення для фіксованого елемента w_{ij} дорівнює величині

$$w_{ij}' = (1+\delta_{ij})w_{ij}\,,$$

якщо $\delta_{ij} \le 0$,

$$w_{ij}' = (1-\delta_{ij})w_{ij} + \delta_{ij}\,,$$

якщо $\delta_{ij} > 0$, де $-1 \le \delta_{ij} \le 1$ – величина збурення.

Для збуреної суперматриці W' розраховується вектор граничних ваг, і на його основі виконується ранжування альтернатив. Нехай нас цікавить питання збереження найкращої альтернативи та нехай $X(i)$ – це підпростір простору *X*, для якого *i*-та альтернатива має перший ранг у ранжируванні та є найкращою.

Аналіз чутливості базується на побудові функції класифікації $B(i,j)$, *яка розділяє* $X(i)$ і $X(j)$. У [15] будується лінійна роздільна функція $B(i,j)$:

$$x^T(w_i - w_j) = \delta_i - \delta_j\,.$$

Проте підпростори $X(i)$ і $X(j)$ не обов'язково завжди лінійно роздільні. Тому в цій роботі розглядається більш загальний підхід і будуються нелінійні функції класифікації підмножин $X(i)$ і $X(j)$ для *i* та *j*-ї альтернатив відповідно.

Для класифікації двох нелінійно роздільних підмножин у роботі використано відомий метод опорних векторів. Згідно з цим методом, рівняння роздільної поверхні у новому просторі більшої розмірності має вигляд

$$\langle W, \varphi(X)\rangle = 0\,,$$

де X – вхідний вектор, W – невідомий вектор параметрів, $\langle\cdot,\cdot\rangle$ – скалярний добуток. Вектор W шукається в результаті розв'язання такої задачі квадратичної оптимізації:

$$\tfrac{1}{2}\langle W,W\rangle + C\textstyle\sum_{i=1}^N \xi_i \to \min_{W,b,\xi_i}$$

$$y_i(\langle W,\varphi(X_i)\rangle + b) \ge 1-\xi_i$$

$$\xi_i \ge 0\,,\ i = 1,...,N\,,$$

де W, b, ξ_i – невідомі задачі; ξ_i – помилка моделі на векторі; $C > 0$ – гіперпараметр моделі.

Застосування методу множників Лагранжа до наведеної вище задачі оптимізації призводить до формули розрахунку вектора параметрів:

$$W = \textstyle\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \varphi(X_i)$$

і рівняння роздільної поверхні:

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i \langle \varphi(X_i), \varphi(X) \rangle = 0,$$

де λ_i – множники Лагранжа, які визначаються за двоїстою задачею

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i - \sum_{i,j=1}^{N} \lambda_i \lambda_j y_i y_j K(X_i, X_j) \to \max_{\Lambda}$$

за обмежень

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i = 0 \text{ та } 0 \le \lambda_i \le C, \; i = 1, \ldots, N .$$

$K: X \times X \to R$ – функція ядра, обчислює скалярний добуток у новому просторі більшої розмірності:

$$K(X_i, X_j) = \langle \varphi(X_i), \varphi(X_j) \rangle .$$

Так, алгоритм класифікації двох, у загальному випадку лінійно нероздільних, підмножин $X(i)$ і $X(j)$ має вигляд формул для будь-якого опорного вектора X_r:

$$f(X) = \mathrm{sign}\left(\sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i K(X_i, X) + b\right),$$

$$b = y_r - \sum_{i=1}^{N} \lambda_i y_i K(X_i, X_r) .$$

Розв'язання практичної задачі

Розглянемо ієрархічну модель [1] для багатокритеріального аналізу пріоритетності інформаційної потреби в СУ ЛП. Вона містить головну ціль – аналіз важливості інформації для підвищення точності прогнозу споживчого попиту та дев'ять типів інформації, які використовують для прогнозування попиту в сучасних системах управління ЛП (у подальшому – альтернативи рішень $a_1 – a_9$). Модель також містить п'ять факторів, які впливають на взаємний обмін інформацією в ЛП (у подальшому – критерії рішень):

– результативність (f_1);
– ступінь використання (f_2);
– прогнозна здатність (f_3);
– надійність (f_4);
– витрати (f_5).

Фактори формують перший рівень ієрархії L_1, альтернативи – другий L_2, головна ціль – нульовий L_0. Розглянемо МПП $D_0^{L_1 L_0}$ для критеріїв $f_1 – f_5$, наведену в [1] (рис. 1). Ваги критеріїв на основі МПП, обчислені за методом RGMM дорівнюють:

$$\hat{w}_{10}^{L_1 L_0} = 0,377, \quad \hat{w}_{20}^{L_1 L_0} = 0,343, \quad \hat{w}_{30}^{L_1 L_0} = 0,149,$$
$$\hat{w}_{40}^{L_1 L_0} = 0,077, \quad \hat{w}_{50}^{L_1 L_0} = 0,054.$$

Локальне ранжування критеріїв:

$$f_1 \succ f_2 \succ f_3 \succ f_4 \succ f_5 . \tag{1}$$

Виконаємо оцінювання стійкості знайденого ранжування критеріїв до змін в елементах МПП $D = D_0^{L_1 L_0}$. Для цього слід обрати "Sensitivity Analysis" у правому верхньому куті вікна на рис. 1.

МПП D допустимо неузгоджена, оскільки $GCI(D) = 0,304 > GCI^{\text{порог}}$. Значення параметра $\Delta > 0$, необхідне для знаходження інтервалів стійкості, задамо $\Delta = GCI^{\text{порог}} - GCI(D) = 0,066$. Інтервали стійкості $CSInt_{ij}(\Delta)$ для елементів МПП D показано на рис. 2 у верхній таблиці. Цей інтервал стійкості характеризує зміну елементу МПП, щоб рівень неузгодженості всієї

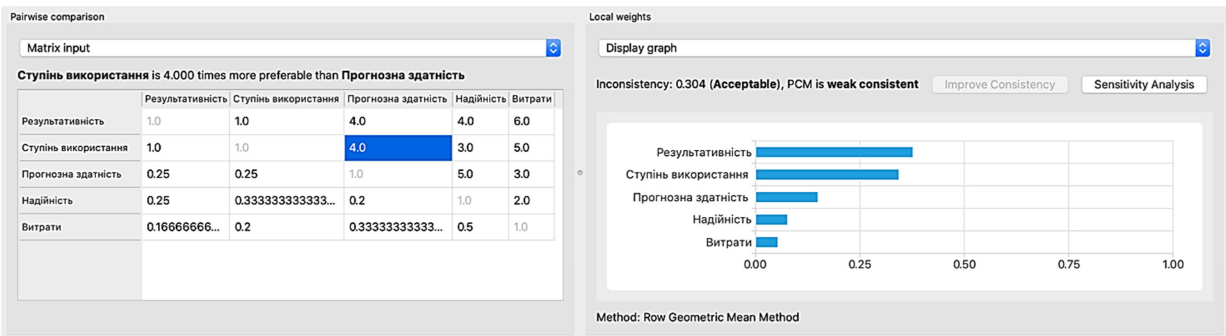

Рис. 1. Матриця парних порівнянь $D = D_0^{L_1 L_0}$ критеріїв

матриці, що описується показником *GCI*, залишався допустимим. Зазначимо, що елементам МПП D для збереження допустимої неузгодженості дозволяється змінюватись у менших інтервалах порівняно з елементами узгодженої МПП.

Індекси стійкості I_{ij} для елементів МПП D наведено на рис. 2 у нижній таблиці. Дослідження, виконане в [3], показало, що найменше значення I_{ij} відповідає найбільш неузгодженому елемента МПП. Тому ***найбільш неузгоджений у МПП D елемент*** – це d_{34} зі значенням індексу стійкості $I_{34} = 1,219$ (див. рис. 2). Дійсно, після присвоєння цьому елемента нового значення $d_{34} := 3$ рівень неузгодженості D зменшиться, про що свідчить менше значення показника неузгодженості $GCI(D) = 0,170$.

Інтервали *RSInt* (рис. 3, 4) описують межі, в яких зміни оцінок експерта не приводять до зміни найкращого критерію чи всього ранжування критеріїв.

Stability intervals:

	ат	нь використ	нозна здатн	Надійність	Витрати
Результативність		[0.5; 2.7]	[0.6; 5.7]	[2.3; 13.7]	[3.3; 18.4]
Ступінь використання			[0.5; 5.4]	[2.0; 16.7]	[3.0; 18.8]
Прогнозна здатність				[0.2; 6.1]	[1.2; 6.0]
Надійність					[0.4; 3.1]

Stability indexes:

	ат	інь використ	гнозна здатні	Надійність	Витрати
Результативність		1.956	1.420	1.713	1.802
Ступінь використання			1.359	1.469	1.646
Прогнозна здатність				1.219	2.014
Надійність					1.534

Рис. 2. Значення $CSInt_{ij}(\Delta)$ і відповідні I_{ij} для матриці парних порівнянь D і $\Delta = 0,066$

Stability intervals:

	ат	ііь використа	эгнозна здатні	Надійність	Витрати
Результативність		[0.8; 10.0]	[2.5; 10.0]	[2.5; 10.0]	[3.8; 10.0]
Ступінь використання			[0.0; 6.4]	[0.0; 4.8]	[0.0; 8.0]
Прогнозна здатність				[0.0; 512.0]	[0.0; 307.2]
Надійність					[0.0; 5760.0]

Stability indexes:

	ат	пінь використа	огнозна здатніс	Надійність	Витрати
Результативність		1.265	0.400	0.400	0.267
Ступінь використання			6.400	4.800	8.000
Прогнозна здатність				512.000	307.200
Надійність					5760.000

Рис. 3. Значення $RSInt_{ij}$ і відповідні I_{ij} для матриці парних порівнянь D

На основі отриманих на рис. 3 цифр знайдено стійкі елементи МПП D для зміни найкращого критерію – це d_{34}, d_{35} і d_{45}, а також менш стійкі елементи d_{23}, d_{24} і d_{25}.

Повернути експерту для перегляду варто елементи d_{13}, d_{14} і d_{15} МПП *D*, оскільки ці елементи найбільш чутливі: невеликі їх зміни призводять до зміни найкращого критерію.

Stability intervals:

	ат	ііь використа	эгнозна здатніс	Надійність	Витрати
Результативність		[0.8; 64.0]	[2.5; 112.5]	[2.5; 24.0]	[3.8; 10.0]
Ступінь використання			[0.5; 6.4]	[0.1; 4.8]	[0.8; 8.0]
Прогнозна здатність				[0.9; 30.0]	[0.5; 10.0]
Надійність					[0.8; 10.0]

Stability indexes:

	ат	пінь використан	огнозна здатніс	Надійність	Витрати
Результативність		1.265	0.400	0.400	0.267
Ступінь використання			2.000	4.800	1.200
Прогнозна здатність				1.061	2.000
Надійність					1.225

Рис. 4. Значення $RSInt_{ij}^{all\ rank}$ і відповідні I_{ij} для матриці парних порівнянь D

Для того щоб підвищити стійкість усього ранжування критеріїв (1), варто, щоб експерт переглянув ті ж елементи d_{13}, d_{14} і d_{15} МПП *D*. Як видно з рис. 4, інші елементи МПП менш чутливі до невеликих змін експертних оцінок і не так впливають на зміну в ранжируванні (1) неголовних критеріїв.

Аналогічно розраховуються стійкі елементи МПП альтернатив рішень відносно кожного з критеріїв.

Висновки

Набув подальшого розвитку метод комплексного оцінювання чутливості, запропонований у [2–4]. Розвинуто етапи оцінювання стійкості локального ранжування елементів мережевої моделі ППР до змін в елементах МПП й оцінювання стійкості елементів МПП до зміни допустимої неузгодженості. Узагальнено метод [15] АЧ результатів на основі мережевої моделі ППР до зміни окремих елементів суперматриці через побудову нелінійної роздільної функції двох підмножин, для *i* та *j*-ї альтернатив відповідно, з використанням засобів машинного навчання.

Знайдено елементи МПП у задачі управління ЛП, які найсуттєвіше впливають на зміну узгодженості цієї матриці та зміну ранжирувань альтернативних рішень. Розраховано стійкі елементи МПП й елементи для перегляду з метою підвищення достовірності розв'язку задачі управління ЛП, які отримуються на основі ієрархічної та мережевої моделей ППР.

Перспективи подальших досліджень предметної області — розробка алгоритмів обробки нечітких експертних суджень учасників ЛП і розрахунку нечітких агрегованих ваг елементів ієрархічних і мережевих моделей управління ЛП.

References

[1] N.I. Nedashkovskaya, "Supply chain management based on hierarchical decision support model", *KPI Sci. News*, vol. 4, pp. 24–34, 2019. doi: 10.20535/kpi-sn.2019.4.180735

[2] N.D. Pankratova and N.I. Nedashkovskaya, "Complex sensitivity analysis of solution based on the analytic hierarchy process", *Syst. Res. Inform. Technol.*, no. 3, pp. 7–25, 2006.

[3] N.I. Nedashkovskaya, "Stability evaluation of local weights of decision alternatives based on pairwise comparison method", *Syst. Res. Inform. Technol.*, no. 4, pp. 14–22, 2016.

[4] N.D. Pankratova and N.I. Nedashkovskaya, "Sensitivity analysis of a decision-making problem using the Analytic Hierarchy Process", *Inform. Theor. Appl.*, vol. 23, no. 3, pp. 232–251, 2016.

[5] N.D. Pankratova and N.I. Nedashkovskaya, "Spectral coefficient of consistency of fuzzy expert information and estimation of its sensitivity to fuzzy scales when solving foresight problems", *Inform. Technol. Knowl.*, vol. 6, no. 4, pp. 316–329, 2012.

[6] N.D. Pankratova and N.I. Nedashkovskaya, "Estimation of sensitivity of the DS/AHP method while solving foresight problems with incomplete data", *Intell. Control. Automat.*, vol. 4, no. 1, pp. 80–86, 2013. doi: 10.4236/ica.2013.41011

[7] E. Triantaphyllou and A. Sánchez, "A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision-making methods", *Decision Sc.*, vol. 28, pp. 151–194, 1997. doi: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x

[8] J.Aguarón and J.M. Moreno-Jiménez, "Local stability intervals in the analytic hierarchy process", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 125, no. 1, pp. 114–133, 2000. doi: 10.1016/S0377-2217(99)00204-0

[9] J.Aguarón *et al.*, "Consistency stability intervals for a judgement in AHP decision support systems", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 145, no. 2, pp. 382–393, 2003. doi: 10.1016/S0377-2217(02)00544-1

[10] T.L. Saaty and M. Sagir, "An essay on rank preservation and reversal", *Math. Comp. Model.*, vol. 49, pp. 1230–1243, 2009. doi: 10.1016/j.mcm.2008.08.001

[11] V. Tsyganok *et al.*, "Usage of multicriteria decision-making support arsenal for strategic planning in environmental protection sphere", *J. Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 24, no. 5-6, pp. 227–238, 2017. doi: 10.1002/mcda.1616

[12] S. Kadenko, "Defining relative weights of data sources during aggregation of pair-wise comparisons", in *Select. Papers of the XVII Int. Sci. Pract. Conf. Information Technologies and Security*, 2017, pp. 47–55.

[13] T. Sowlati *et al.*, "Developing a mathematical programming model for sensitivity analysis in analytic hierarchy process", *Int. J. Math. Oper. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 290–301, 2010. doi: 10.1504/IJMOR.2010.032719

[14] M. Ivanco *et al.*, "Sensitivity analysis method to address user disparities in the analytic hierarchy process", *Expert Syst. Applicat.*, vol. 90, pp. 111–126, 2017. doi: 10.1016/j.eswa.2017.08.003

[15] J.H. May *et al.*, "A new methodology for sensitivity and stability analysis of analytic network models", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 224, no. 1, pp. 180–188, 2013. doi: 10.1016/j.ejor.2012.07.035

[16] T.L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process.* New York: McGraw Hill, 1980.

[17] T.L. Saaty and L.G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process.* Springer, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6

[18] T.L. Saaty, *The Analytic Network Process: Decision Making with Dependence and Feedback.* Pittsburgh, PA: RWS Publications, 2001.

[19] S. Kheybari *et al.*, "Analytic network process: An overview of applications", *Appl. Math. Comput.*, vol. 367, 2020. doi: 10.1016/j.amc.2019.124780

[20] Y. Chen *et al.*, "Analytic network process: Academic insights and perspectives analysis", *J. Cleaner Prod.,* vol. 235, pp. 1276–1294, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.07.016

[21] N.I. Nedashkovskaya, "A system approach to decision support based on hierarchical and network models", *Syst. Res. Inform. Technol*, no. 1, pp. 7–18, 2018. doi: 10.20535/SRIT.2308-8893.2018.1.01.

Н.И. Недашковская

ОЦЕНИВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ И СЕТЕВОЙ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Проблематика. Прогнозирование будущих продаж необходимо для контроля потока товаров в цепях поставок (ЦП), поэтому фирмы выполняют прогнозирование потребительского спроса. Для исследования достоверности решения выполняют анализ чувствительности (АЧ) результатов к изменениям в исходных данных. Сетевые модели поддержки принятия решений (ППР) обычно содержат очень большое количество элементов и связей между ними, что затрудняет выполнение АЧ.

Цель исследования. Оценить чувствительность решения, заданого в виде ранжирования элементов сетевой модели ППР, к неточностям и противоречиям в элементах экспертных матриц парных сравнений (МПС), а также к изменению отдельных элементов суперматрицы сетевой модели ППР. Определить приоритетность различных типов информации в системе управления (СУ) ЦП и определить чувствительность решения для получения более точного прогноза потребительского спроса.

Методика реализации. Оценивание моделей ППР для определения приоритетности информационной потребности в ЦП осуществляется на основе развитого метода анализа сетей. Метод оценки чувствительности решения, который предлагается для иерархической модели ППР, включает нахождение устойчивых элементов каждого уровня иерархии и оценку степени чувствительности глобального ранжирования элементов. Чувствительность решения на основе сетевой модели включает оценку устойчивости локальных ранжирований, нахождение элементов матрицы, которые наиболее влияют на изменение согласованности и изменение локального ранжирования, а также чувствительность к изменению отдельных элементов суперматрицы модели.

Результаты исследования. Получил дальнейшее развитие метод комплексной оценки чувствительности, усовершенствованы этапы оценки устойчивости локального ранжирования элементов сетевой модели ППР и устойчивости элементов матрицы к изменению допустимой несогласованности. Обобщен метод АЧ результатов на основе сетевой модели ППР к изменению отдельных элементов суперматрицы с использованием средств машинного обучения.

Выводы. В задаче управления ЦП найдены элементы экспертной МПС, которые в наибольшей степени влияют на изменение согласованности и изменение ранжирований альтернатив решений. Рассчитаны устойчивые элементы матрицы и элементы для пересмотра экспертом с целью повышения достоверности решения задачи управления ЦП на основе иерархической и сетевой моделей ППР.

Ключевые слова: управление цепями поставок; иерархическая модель; сетевая модель; многокритериальный анализ; поддержка принятия решений; экспертные оценки; матрица парных сравнений; чувствительность решения; устойчивость решения.

N.I. Nedashkovskaya

SENSITIVITY ANALYSIS OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROBLEM BASED ON HIERARCHICAL AND NETWORK DECISION SUPPORT MODELS

Background. Predicting future sales is necessary to control the flow of goods in supply chains (SC), which is why firms perform forecasting of consumer demand. To study the reliability of the solution, the sensitivity analysis (SA) of the results to changes in the original data is performed. Network decision support (DS) models usually contain a very large number of elements and connections between them, which makes it difficult to perform SA.

Objective. The aim of the paper is to assess the sensitivity of the solution, given in the form of the element ranking of the network DS model, to inaccuracies and contradictions in elements of expert pairwise comparison matrices (PCMs), as well as to changes in individual elements of the supermatrix of the network DS model. To assess the priority of different types of information in the SC management system and to assess the sensitivity of the decision to obtain a more accurate forecast of consumer demand.

Methods. Evaluation of DS models to prioritize information needs in the SC management system is carried out based on a developed method of network analysis. The method for assessing the sensitivity of the decision, proposed for the hierarchical DS model, includes finding stable elements of each level of the hierarchy and assessing the degree of sensitivity of global ranking of elements. The sensitivity of a solution based on a network DS model includes an assessment of the stability of local rankings, finding the matrix elements that most affect the change in consistency and change in the local ranking, as well as the sensitivity to changes in individual elements of the model supermatrix.

Results. The method of complex assessment of sensitivity has been further developed, the stages of assessing the stability of local ranking of elements of the network DS model and the resilience of the pairwise comparison matrix elements to changes in the permissible inconsistency have been improved. A method for SA of results based on the network DS model to changes in individual elements of the supermatrix using machine learning tools is generalized.

Conclusions. In the SC management problem, the elements of the expert PCM are found, which to the greatest extent affect the change in consistency and change in the rankings of decision alternatives. The stable elements of the matrix and elements for revision by an expert were calculated in order to increase the reliability of the solution to the SC management problem based on the hierarchical and network DS models.

Keywords: supply chain management; hierarchical model; network model; multiple criteria analysis; decision support; expert assessments; pairwise comparison matrix; sensitivity of the solution; stability of the solution.

Рекомендована Радою
Інституту прикладного системного аналізу
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
17 липня 2020 року

Прийнята до публікації
10 грудня 2020 року