УДК 519.816

Ю.Я. САМОХВАЛОВ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: *yu1953@ukr.net.*

РОЗВИТОК МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ В УМОВАХ КОЛЕКТИВНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ АГРЕГОВАНИХ МАТРИЦЬ ПАРНИХ ПОРІВНЯНЬ

Анотація. Запропоновано підхід до колективного прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій. Цей підхід базується на механізмі побудови агрегованих матриць парних порівнянь. Ключовим у цьому механізмі є узгодження полярних суджень експертів щодо переваги альтернатив. Таке узгодження реалізовано завдяки вибору найбільш справедливої гіпотези на підставі ступіня впевненості в її достовірності. Ступінь впевненості запропоновано обчислювати за допомогою функції комбінування Шортліффа. Узгодження полярних суджень експертів являє собою обчислювальну модель групового вибору, яка є незалежною компонентою і може бути використана як основа для розроблення процедур колективного прийняття рішень. Запропонований підхід є достатньо природним та простим у використанні і гармонійно становить одноцілість в процесі аналітичної ієрархії.

Ключові слова: колективне прийняття рішень, ранжування, експерт, метод аналізу ієрархій, коефіцієнти впевненості.

ВСТУП

У практиці прийняття рішень широко використовують метод аналізу ієрархій (МАІ), який є одним із ефективних методів системного аналізу і може застосовуватися як однією людиною, так і групою експертів залежно від складності поставленої задачі [1]. Причому така група є колективним експертом, що приймає рішення або в результаті консенсусу, або, якщо спільного висновку досягти не вдається, використовує деяке правило, що існує для досягнення єдиного судження.

З огляду на викладене було запропоновано різні розширення цього методу на випадок колективного прийняття рішень [2–15]. Так, у [2] запропоновано модель прийняття групових рішень у процесах аналітичної ієрархії (AHP-GDM) для зниження інвестиційного ризику. Щоб задовольнити властивості зворотної матриці, для коригування матриці групових рішень застосовують метод найменших квадратів.

У [3] розглянуто модифіковані алгоритми МАІ з урахуванням суджень декількох експертів і проблемних ситуацій. При цьому як правило групового вибору використовують правило Борда. Процедури агрегування суджень, виражених за допомогою матриць парних порівнянь, наведено в [4, 5]. У [6] розглянуто застосування AHP для групового прийняття рішень (AHP-GDM) з урахуванням когнітивних рівнів різних експертів. Нечітке розширення процесу аналітичної ієрархії до прийняття групових рішень описано в [7]. У [8, 9] наведено способи виявлення відмінностей у судженнях та їхнє згладжування, розв'язання конфліктів та об'єднання індивідуальних суджень для отримання загальної групової переваги. У [10] розглянуто метод Раманатана і Ганеша визначення пріоритетів осіб, які приймають рішення. Показано його використання в процесі агрегування групових переваг людей, судження яких нерівнозначні. Порівняння методів агрегування розглянуто в [11–13]. У [14] запропоновано метод DS/AHP, який об'єднує теорію доведення Демпстера–Шейфера з AHP. Цей метод дає змогу робити судження з урахуванням групових альтернативних рішень, а також пропонує міру невизначеності в кінцевих результатах. У [15] розвинуто метод DS/AHP, як ефективний інструмент у груповому прийнятті рішень. Тут увага приділяється сукупності свідчень окремих членів групи, які вважаються нееквівалентними за своєю значимістю.

У цій статті запропоновано альтернативний підхід до використання МАІ у випадку групового прийняття рішень. Він ґрунтується на механізмі вибору за принципом максимальної впевненості, який реалізовано схемою Шортліффа.

ПОБУДОВА АГРЕГОВАНИХ МАТРИЦЬ ПАРНИХ ПОРІВНЯНЬ

Ключовим моментом МАІ у випадку групового прийняття рішень є агрегування індивідуальних суджень членів групи. Індивідуальні судження можна агрегувати по-різному: або індивідуальні парні порівняння, або індивідуальні пріоритети. Якщо під час прийняття рішень члени групи діють як окремі особи, то агрегувати їхні судження краще на рівні індивідуальних пріоритетів. У цьому випадку можна застосувати медіану Кемені, або її модифікацію [16], яка враховує вагові коефіцієнти членів групи. Проте, під час групового прийняття рішень члени групи зазвичай діють разом, тобто комунікують, а не як окремі особи, тому доцільніше використовувати перший спосіб [10].

Нехай задана ієрархія $\mathcal{J}$ задачі групового вибору і множина E експертів ($|E| = r$), причому r непарне. Також нехай $M^l = \{M_k^l = \left\| m_{ij}^{lk} \right\| \mid k = \overline{1, r}\}$ — множина матриць індивідуальних парних порівнянь альтернатив відносно l-го критерію. Зауважимо щодо побудови індивідуальних матриць парних порівнянь. Якщо парні порівняння здійснюють для якісного критерію, то експерти оцінюють тільки домінування альтернатив, тому що завжди можна визначити незначну перевагу однієї альтернативи над іншою, навіть під час фізичних вимірювань, не кажучи вже про якісні характеристики, яким притаманна багатогранність.

Елементи агрегованої матриці M_A^l обчислюють для кожної пари альтернатив у такий спосіб. Розглядають судження експертів щодо ординальної переваги альтернатив i та j. Якщо є повний збіг точок зору експертів (для $\forall k$ має місце або $m_{ij}^{lk} > 1$, або $m_{ij}^{lk} < 1$, або $m_{ij}^{lk} = 1$), то агрегований елемент $\overline{m}_{ij}^l$ матриці M_A^l обчислюється за формулою:

$$\overline{m}_{ij}^l = \prod_{k=1}^{r} (m_{ij}^{lk})^{\mu_k}, \tag{1}$$

причому $\sum_{k=1}^{r} \mu_k = 1$.

Якщо у судженнях експертів щодо переваги альтернатив i та j є розбіжності вигляду $i \succ j$ і $i \prec j$, то безпосереднє застосування цієї формули не правомірно. А саме, якщо, наприклад, два рівноцінні експерти вказують під час порівняння цих альтернатив взаємно-зворотні оцінки, то в процесі обчислення агрегованої оцінки за формулою (1) буде отримана одиниця, що свідчить про їхню еквівалентність. А оскільки це нове судження, воно не може бути результатом механічного усереднення оцінок. У цьому випадку такі розбіжності усуваються або в результаті консенсусу, або, якщо спільного висновку досягти не вдається, на основі принципу групового вибору, який визначає правило отримання узгодженого судження.

Розглянемо такі положення.

Суб'єктом рішення є людина, оскільки вона і тільки вона приймає рішення і відповідає за наслідки його реалізації. Тому механізм групового вибору повинен враховувати її поведінкові характеристики.

З точки зору психології прийняття рішень основною рушійною силою в момент, коли робимо вибір на користь однієї з альтернатив, тобто під час прийняття того чи іншого рішення, є впевненість у правильності цього вибору.

Це твердження будемо використовувати як принцип впевненості в процесі групового вибору.

Далі, назвемо судження $i \succ j$ та $i \prec j$ гіпотезами і позначимо їх відповідно h_1 і h_2. Тоді як підставу для вибору тієї чи іншої гіпотези будемо використовувати ступінь впевненості у її істинності.

Уведемо функцію $f(h)$, яка гіпотезі h ставить у відповідність її ступінь впевненості η з урахуванням суджень усіх експертів щодо гіпотези h. Тоді гіпотезою вибору буде гіпотеза h_{k_0}, де $k_0 = \arg\max_k \eta_k$. Якщо $\eta_1 = \eta_2$, то вибір однієї з гіпотез h_1 і h_2 здійснюється за правилом більшості.

Нехай r_{k_0} — кількість експертів, які висловили гіпотезу h_{k_0}, тоді елемент $\overline{m}_{ij}^{\,l}$ матриці M_A^l обчислюється за формулою:

$$\overline{m}_{ij}^{\,l} = \prod_{k=1}^{r_{k_0}} (m_{ij}^{lk})^{\mu_k}. \tag{2}$$

У цій формулі для вагових коефіцієнтів виконується умова $\sum_{k=1}^{r_{k_0}} \mu_k = 1$. Аналогічно будуються агреговані матриці парних порівнянь альтернатив відносно інших критеріїв.

ОБЧИСЛЕННЯ СТУПЕНЯ ВПЕВНЕНОСТІ В ГІПОТЕЗІ

З позицій психології, як зазначено в [17], впевненість окремого індивідуума в гіпотезі ґрунтується на переконанні, що він має довіру до неї. Своєю чергою, довіра ґрунтується на доведеній справедливості гіпотези. Таким чином, впевненість є виразом переконаності, отриманої через оцінку довіри.

З точки зору логіки, гіпотеза, як припущення, — це висновок за схемами умовно-категоричного силогізму, істинне значення посилок якого є невизначеним. Для вимірювання ступеня довіри до висновку будь-якого продукційного правила Шортліфф розробив схему [18, 19], яка є ефективною у практичних застосунках. Ця схема заснована на так званих коефіцієнтах впевненості, які відображають зв'язок між впевненістю та довірою.

Нехай експерт e висловив гіпотезу h щодо домінування альтернатив i та j. Тоді між альтернативами, експертом і гіпотезою існує причинно-наслідковий зв'язок, який можна представити правилом $i, j, e \to h$. Для простоти антецедент i, j, e цього правила позначимо e, як одноцілість. Тоді коефіцієнт впевненості в гіпотезі h, висловленої експертом e, будемо обчислювати за формулою [19]:

$$CF[h,e] = \frac{MB[h,e] - MD[h,e]}{1 - \min(MB[h,e], MD[h,e])}, \tag{3}$$

де $MB[h,e]$ — міра довіри, а $MD[h,e]$ — міра недовіри до гіпотези h. Тут під мірою довіри $MB[h,e]$ розуміється ймовірність того, що гіпотеза h є істинною. Тож $1 - MB[h,e]$ можна розглядати як оцінку недовіри $MD[h,e]$ до істини h. Для визначення міри довіри будемо виходити з наведених далі міркувань.

Відповідно до теорії суб'єктивної ймовірності можна стверджувати, що особиста ймовірність експерта відображає його віру в гіпотезу у будь-який момент часу. Існує декілька способів визначення суб'єктивної ймовірності [20]. Найбільш доступний спосіб пов'язує суб'єктивну ймовірність експерта з його ваговим коефіцієнтом. Якщо $\mu \in [0,1]$ — ваговий коефіцієнт експерта, то μ — його особиста ймовірність. Тобто, якщо експерт висловив гіпотезу h, ймовірність її істинності буде μ.

Далі, якщо ординальні судження декількох експертів щодо домінування альтернатив i та j збігаються, то ці експерти повинні спільно забезпечувати більшу впевненість у цьому судженні, ніж кожен з них окремо. З огляду на незалежність суджень експертів для врахування спільного впливу їхніх думок використовується наведена ділі функція комбінування.

Нехай $CF_1[h, e_1], CF_2[h, e_2]$ — коефіцієнти впевненості в гіпотезі h, висловленої експертами e_1 і e_2. Тоді коефіцієнт $CF[h, e_1 \& e_2] = CF_2[h]$ їхньої спільної підтримки гіпотези h обчислюється функцією [19]:

$$CF_2[h] = \begin{cases} CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2](1 - CF_1[h, e_1]), & CF_1[h, e_1] > 0,\ CF_2[h, e_2] > 0, \\ CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2](1 + CF_1[h, e_1]), & CF_1[h, e_1] < 0,\ CF_2[h, e_2] < 0, \\ \dfrac{CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2]}{1 - \min(|CF_1[h, e_1]|, |CF_2[h, e_2]|)}, & CF_1[h, e_1] \cdot CF_2[h, e_2] < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Якщо у експертів є протилежні судження щодо переваги альтернатив i та j, тоді також можна врахувати їхню спільну, але непряму підтримку.

Нехай експерти e_1, e_2 висловили гіпотези $h_1(i \succ j)$ і $h_2(i \prec j)$. Також нехай μ_1, μ_2 — їхні вагові коефіцієнти. Тоді з ймовірністю μ_1 можна вважати гіпотезу h_1 істиною, а з ймовірністю $1 - \mu_1$ вважати істиною гіпотезу h_2, і навпаки. Виходячи з цього, коефіцієнт впевненості $CF(h_2, e_1)$ в істинності гіпотези h_2 за підтримки експертом e_1 гіпотези h_1 можна обчислити за формулою (3), в якій $MB[h_2, e_1] = 1 - \mu_1$, а $MD[h_2, e_1] = \mu_1$. Коефіцієнт впевненості $CF[h_1, e_2]$ обчислюється аналогічно. Тоді за наявності більше двох експертів їхня спільна підтримка гіпотези h може бути врахована послідовним застосуванням формули (4) для об'єднання сумарної підтримки вже врахованих експертів з підтримкою наступного, ще не врахованого експерта.

Нехай $CF[h, e_1 \& e_2 \& \ldots \& e_n] = CF_n[h]$ — коефіцієнт впевненості в справедливості гіпотези h за підтримки її n експертами, а $CF_i[h, e_i]$ — коефіцієнт впевненості в гіпотезі h за підтримки її i-м експертом. Тоді коефіцієнт впевненості в гіпотезі h за підтримки її усіма експертами обчислюється за рекурентною формулою

$$CF_2[h] = \begin{cases} CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2](1 - CF_1[h, e_1]), & CF_1[h, e_1] > 0,\ CF_2[h, e_2] > 0, \\ CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2](1 + CF_1[h, e_1]), & CF_1[h, e_1] < 0,\ CF_2[h, e_2] < 0, \\ \dfrac{CF_1[h, e_1] + CF_2[h, e_2]}{1 - \min(|CF_1[h, e_1]|, |CF_2[h, e_2]|)}, & CF_1[h, e_1] \cdot CF_2[h, e_2] < 0, \end{cases}$$

$$i = \overline{3, n}, \quad (5)$$

$$CF_i[h] = \begin{cases} CF_{i-1}[h] + CF_i[h, e_i](1 - CF_{i-1}[h]), & CF_{i-1}[h] > 0,\ CF_i[h, e_i] > 0, \\ CF_{i-1}[h] + CF_i[h, e_i](1 + CF_{i-1}[h]), & CF_{i-1}[h] < 0,\ CF_i[h, e_i] < 0, \\ \dfrac{CF_{i-1}[h] + CF_i[h, e_i]}{1 - \min(|CF_{i-1}[h]|, |CF_i[h, e_i]|)}, & CF_{i-1}[h] \cdot CF_i[h, e_i] < 0. \end{cases}$$

Цю формулу будемо використовувати як функцію $f(h)$.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Для скорочення обсягу обчислень розглянемо однокритеріальну задачу колективного прийняття рішення. Нехай $A = \{a_i \mid i = \overline{1, 4}\}$ — множина альтернатив, а $E=(e_1/_{0.6}, e_2/_{0.8}, e_3/_{0.7}, e_4/_{0.9}, e_5/_{0.8})$ — група експертів. Також нехай експерти побудували такі матриці парних порівнянь:

$$M_1=\begin{vmatrix}1 & 2 & 6 & 9\\ 1/2 & 1 & 4 & 7\\ 1/6 & 1/4 & 1 & 2\\ 1/9 & 1/7 & 1/2 & 1\end{vmatrix}, M_2=\begin{vmatrix}1 & 1/3 & 1/5 & 2\\ 3 & 1 & 3 & 2\\ 5 & 1/3 & 1 & 3\\ 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1\end{vmatrix}, M_3=\begin{vmatrix}1 & 1/4 & 6 & 9\\ 4 & 1 & 2 & 5\\ 1/6 & 1/2 & 1 & 3\\ 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1\end{vmatrix},$$

$$M_4=\begin{vmatrix}1 & 2 & 1/7 & 8\\ 1/2 & 1 & 4 & 7\\ 7 & 1/4 & 1 & 2\\ 1/8 & 1/7 & 1/2 & 1\end{vmatrix},\ M_5=\begin{vmatrix}1 & 2 & 1/6 & 7\\ 1/2 & 1 & 3 & 7\\ 6 & 1/3 & 1 & 2\\ 1/7 & 1/7 & 1/2 & 1\end{vmatrix}.$$

Оскільки розглядається однокритеріальна задача, будується одна агрегована матриця M_A. Щодо пар альтернатив $(a_1,a_4),(a_2,a_3),(a_2,a_4),(a_3,a_4)$ судження експертів про їхні переваги збігаються, тому відповідні елементи матриці M_A обчислюються за формулою (1):

$$\overline{m}_{14}=9^{0.16}\cdot 2^{0.21}\cdot 9^{0.18}\cdot 8^{0.24}\cdot 7^{0.21}=6.05,$$

$$\overline{m}_{23}=4^{0.16}\cdot 3^{0.21}\cdot 2^{0.18}\cdot 4^{0.24}\cdot 3^{0.21}=3.13,$$

$$\overline{m}_{24}=7^{0.16}\cdot 2^{0.21}\cdot 5^{0.18}\cdot 7^{0.24}\cdot 7^{0.21}=5.06,$$

$$\overline{m}_{34}=2^{0.16}\cdot 3^{0.21}\cdot 3^{0.18}\cdot 2^{0.24}\cdot 2^{0.21}=2.34.$$

Стосовно альтернатив a_1,a_2 і a_1,a_3 експерти мають полярні судження щодо їхніх переваг. Так, для пари a_1,a_2 експерти e_1,e_4,e_5 вважають, що $h_1(a_1\succ a_2)$, а експерти e_2,e_3 вважають, що $h_2(a_1\prec a_2)$. Для пары a_1,a_3 експерти e_1,e_3 вважають, що $h_3(a_1\succ a_2)$, а експерти e_2,e_4,e_5 вважають, що $h_4(a_1\prec a_3)$. Зазначимо, що оскільки для гіпотез h_1 і h_2 виконується умова «якщо $CF_5[h_1]>0$, то $CF_5[h_2]<0$», тому достатньо обчислити коефіцієнт впевненості в одній з гіпотез.

Згідно з (3) обчислимо коефіцієнти впевненості в гіпотезі h_1 за її підтримки кожним експертом:

$$CF_1[h_1,e_1]=\frac{MB[h_1,e_1]-MD[h_1,e_1]}{1-\min(MB[h_1,e_1],MD[h_1,e_1])}=$$

$$=\frac{\mu_1-(1-\mu_1)}{1-\min(\mu_1,(1-\mu_1))}=\frac{0.6-0.4}{1-0.4}=\frac{0.2}{0.6}=0.33,$$

$$CF_2[h_1,e_2]=\frac{MB[h_1,e_2]-MD[h_1,e_2]}{1-\min(MB[h_1,e_2],MD[h_1,e_2])}=$$

$$=\frac{(1-\mu_2)-\mu_2}{1-\min((1-\mu_2)-\mu_2)}=\frac{0.2-0.8}{1-0.2}=-\frac{0.6}{0.8}=-0.75$$

і аналогічно $CF_3[h_1,e_3]=-0.57$, $CF_4[h_1,e_4]=0.89$, $CF_5[h_1,e_5]=0.75$.

Потім згідно з (5) обчислимо коефіцієнт впевненості в гіпотезі h_1 з урахуванням суджень усіх експертів:

$$CF_2[h_1] = \frac{CF_1[h_1, e_1] + CF_2[h_1, e_2]}{1 - \min(|CF_1[h_1, e_1]|, |CF_2[h_1, e_2]|)} = -0.63,$$

$$CF_3[h_1] = CF_2[h_1] + CF_3[h_1, e_3] + CF_2[h_1] \cdot CF_3[h_1, e_3] = -0.84,$$

$$CF_4[h_1] = \frac{CF_3[h_1] + CF_4[h_1, e_4]}{1 - \min(|CF_3[h_1]|, |CF_4[h_1, e_4]|)} = 0.31,$$

$$CF_5[h_1] = CF_4[h_1] + CF_5[h_1, e_5] - CF_4[h_1] \cdot CF_5[h_1, e_5] = 0.83.$$

Отже, гіпотеза h_1 є груповим судженням щодо домінування альтернатив a_1 і a_2, тобто $a_1 \succ a_2$. Проводячи аналогічні обчислення для гіпотези h_3, отримуємо $CF_5[h_3] = -0.97$, що свідчить про домінування альтернативи a_3 над альтернативою a_1.

З огляду на це елементи $\overline{m}_{12}, \overline{m}_{31}$ матриці M_A згідно з (2) обчислюються за формулами: $\overline{m}_{12} = (2^{0.26} \cdot 2^{0.39} \cdot 2^{0.35}) = 2$ і $\overline{m}_{31} = (5^{0.32} \cdot 7^{0.36} \cdot 6^{0.32}) = 5.98$. У результаті отримаємо таку агреговану матрицю:

$$M_1 = \begin{vmatrix} 1 & 2.00 & 0.17 & 6.05 \\ 0.50 & 1 & 3.13 & 5.06 \\ 5.98 & 0.32 & 1 & 2.34 \\ 0.16 & 0.2 & 0.43 & 1 \end{vmatrix},$$

власний вектор $V = (1.2, 1.7, 1.5, 0.3)$ якої в цьому випадку задає результівне метрізоване ранжування альтернатив $a_2 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_4$.

ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід до колективного прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій. Цей підхід базується на механізмі побудови агрегованих матриць парних порівнянь. Ключовим моментом цього механізму є узгодження полярних суджень експертів щодо переваги альтернатив. Узгодження реалізовано завдяки вибору найбільш справедливої гіпотези. Підставою такого вибору є ступінь впевненості, з якою можна вважати гіпотезу достовірною. При цьому ступінь впевненості обчислюється за допомогою функції комбінування Шортліффа. Таке узгодження являє собою обчислювальну модель групового вибору, яка є незалежною компонентою і може бути використана як основа для розроблення процедур колективного прийняття рішень. Загалом, запропонований підхід є достатньо природним та простим у використанні і гармонійно становить одноцілість в процесі аналітичної ієрархії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhushan N., K. Rai K. Strategic decision making: Applying the analytic hierarchy process. London: Springer, 2004. 172 p.
2. Wu W., Kou G., Peng Y., Ergu D. Improved AHP-group decision making for investment strategy selection. *Technological and Economic Development of Economy*. 2012. Vol. 18, Iss. 2. P. 299–316. https://doi.org/10.3846/20294913.2012.680520.
3. Середенко Н.Н. Развитие метода анализа иерархий (МАИ). *Открытое образование*. 2011. № 2–1. С. 39–48.
4. Халин В.Г., Чернова Г.В. Системы поддержки принятия решений. Москва: Юрайт, 2019. 494 с.
5. Samokhvalov Y.Y. Group accounting of relative alternative superiority in decision-making problems. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2003. Vol. 39, N 6. P. 897–900. https://doi.org/10.1023/B:CASA.0000020231.09571.33.

6. Wu W., Kou G., Peng Y. Group decision-making using improved multi-criteria decision making methods for credit risk analysis. *Filomat.* 2016. Vol. 30, Iss. 15. P. 4135–4150. https://doi.org/10.2298/FIL1615135W.
7. Kar A.K., Khatwani G. A group decision support system for selecting a socialCRM. Thampi S., Gelbukh A., Mukhopadhyay J. (Eds.). *Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Cham: Springer, 2014. Vol. 264. P. 95–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04960-1_9.
8. Saaty T., Peniwati K. Group decision making: Drawing out and reconciling differences, Pittsburgh: Rws Publications, 2008. 385 p.
9. Peniwati K. Group decision making: drawing out and reconciling differences. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process.* 2017. Vol. 9, N 3. P. 385–389. https://doi.org/10.13033/ijahp.v9i3.533.
10. Forman E., Peniwati K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research.* 1998. Vol. 108, Iss. 1. P. 165–169. https://doi:10.1016/s0377-2217(97)00244-0.
11. Grošelj P., Zadnik Stirn L., Ayrilmis N., Kuzman M.K. Comparison of some aggregation techniques using group analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications.* 2015. Vol. 42. P. 2198–2204. https://doi.org/10.1016/j.eswa.
12. Bernasconi M., Choirat C., Seri R. Empirical properties of group preference aggregation methods employed in AHP: Theory and evidence. *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 232, N 3. P. 584–592. https://doi.org/10.1016/j.ejor.
13. Samokhvalov Y.Y. Distinctive features of using the method of analysis of hierarchies in estimating problems on the basis of metric criteria. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2004. Vol. 40, N 5. P. 639–642. https://doi.org/10.1007/s10559-005-0002-2.
14. Malcolm B. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research.* 2002. Vol. 140, Iss. 1. P. 148–164. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00230-2.
15. Malcolm B. A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group. *Computers and Operations Research*. 2005. Vol. 32, N 7. P. 1881–1896. https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.12.004.
16. Гуляницкий, Л.Ф., Волкович О.В., Малышко С.А. Один поход к формализации и исследованию задач группового выбора. *Кибернетика.* 1994. № 3. С. 120–127.
17. ISO/IEC TR 15443-1:2005 «Information technology — Security techniques — A framework for IT security assurance. Part 1: Overview and framework». URL: https://www.iso.org/standard/39733.html.
18. Shortliffe E. Computer-based medical consultations: MYCIN. Elsevier, 1976, 264 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-00179-5.X5001-X.
19. Buchanan B., Shortliffe E. Rule-based expert systems: The MYCIN experiments of the Stanford heuristic programming project. Addison Wesley, Reading, MA, 1984. 754 p.
20. Дулесов А.С., Семенова М.Ю. Субъективная вероятность в определении меры неопределенности состояния объекта. *Фундаментальные исследования.* 2012. № 3. С. 81–86.

Yu.Ya. Samokhvalov

DEVELOPMENT OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS UNDER COLLECTIVE DECISION-MAKING BASED ON AGGREGATED MATRICES OF PAIRWISE COMPARISONS

Abstract. An approach to collective decision-making based on the analytic hierarchy process is proposed. This approach is based on the mechanism of constructing aggregated matrices of pairwise comparisons. The key point of this mechanism is to reconcile the polar opinions of experts on the preference of alternatives. Such harmonization of opinions is implemented by choosing the most fair hypothesis. The basis for this choice is the degree of confidence in the validity of this hypothesis. The degree of confidence is calculated using the Shortliff combination function. Coordination of polar opinions of experts is a computational model of group choice, which is an independent component and can be used as a basis for the development of collective decision-making procedures. In general, the proposed approach is quite natural and easy to use and harmoniously forms a single whole within the analytic hierarchy process.

Keywords: collective decision-making, ranking, expert, hierarchy analysis method, confidence coefficients.

Надійшла до редакції 21.06.2022