

В. О. БУРЕНКО

аспірант кафедри управління проектами  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
ORCID: 0000-0002-0862-5879

## ГРУПОВІ ЕКСПЕРТНІ ОЦІНКИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ «РОЗУМНОГО МІСТА»

У даній роботі розглянута проблема вибору транспортних засобів для логістичного забезпечення мультимодальних перевезень пасажирів як така, що має вирішуватися в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних. У виконаних дослідженнях набули подальшого розвитку теоретичні положення групових експертних оцінок на основі метрик з використанням математичного апарату теорії свідочств Демстера-Шефера та кластерного аналізу. Проведено розрахунки значень різних метрик (відстаней Тессема, Джоссельме, Евкліда, Бхаттарія, Ванга), що характеризують міру відмінності між виділеними групами експертних свідочств. На основі розрахунків показано, що вибір метрики є одним з основних факторів, які впливають на результати розбиття вихідної сукупності експертних свідочств і формування підгруп експертів з досить близькими оцінками. Доведено, що у разі використання у якості експертів представників декількох адмінрайонів міста (диспетчерів) та/або компаній-перевізників можуть бути використані додаткові процедури для зближення думок різних підгруп. Або, за умови, що свідочства експертів стійкі та остаточні, можливе проведення агрегування експертних свідочств для кожної підгрупи окремо. В результаті досліджень виконано синтез математичної моделі управління невизначеностями та розробка інноваційної інформаційно-комп'ютерної технології (ІКТ) підтримки прийняття рішень для автоматизованої подачі міського автотранспорту на зупинки. Метод реалізовано на основі підрахунку кількості пасажирів на зупинках за даними ІР-відеоспостереження комп'ютерної системи «Розумне місто».

**Ключові слова:** обробка інформації в комп'ютерних системах, «Розумне місто», ІР-відеоспостереження, автоматизація подачі міського пасажирського транспорту, групові експертні оцінки, теорія свідочств, метрики, кластеризація, невизначеність.

V. O. BURENKO

Postgraduate Student at the Department of Project Management  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding  
ORCID: 0000-0002-0862-5879

## GROUP EXPERT JUDGMENTS OF INFORMATION PROCESSING IN COMPUTER SYSTEMS OF THE SMART CITY

In this article, the problem of choosing vehicles for logistical support of multimodal transportation of passengers is considered as such, which must be solved in conditions of uncertainty and vagueness of the initial data. In the conducted studies, the theoretical propositions of group expert evaluations based on metrics using the mathematical apparatus of Dempster-Shafer's evidence theory and cluster analysis were further developed. The values of various metrics (Tessema, Josselme, Euclid, Bhattacharya, Wang distances) characterizing the degree of difference between selected groups of expert certificates were calculated. On the basis of calculations, it is shown that the choice of metric is one of the main factors that affect the results of dividing the original set of expert certificates and forming subgroups of experts with fairly close assessments. It has been proven that if representatives of several administrative districts of the city (dispatchers) and/or transport companies are used as experts, additional procedures can be used to bring together the opinions of different subgroups. Or, provided that expert testimony is stable and final, it is possible to aggregate expert testimony for each subgroup separately. As a result of the research, the synthesis of a mathematical model of uncertainty management and the development of innovative information and computer technology (ICT) decision support for the automated submission of city vehicles to stops were performed. The method is implemented on the basis of counting the number of passengers at bus stops based on IP video surveillance data of the "Smart City" computer system.

**Key words:** information processing in computer systems, "Smart City", IP video surveillance, automatization of city passenger transportation, group expert judgments, evidence theory, metrics, clustering, uncertainty.

### Постановка проблеми

При здійсненні обробки інформації в комп'ютерних системах, призначених для автоматизації подачі міського транспорту на основі аналізу наповненості зупинок пасажирами, однією з основних проблем є визначення номерів маршрутів автотранспорту. В такому разі рішення задачі вибору транспортних засобів для логістичного забезпечення мультимодальних перевезень пасажирів виконується в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних. Це пояснюється тим, що на підставі підрахунку кількості пасажирів на зупинках за допомогою зображень

з IP-камер системи «Розумне місто» не можна визначити, за яким саме маршрутом бажають переміщуватись пасажирів на кожній зупинці, і яка кількість людей потребує кожного з номерів маршрутів, що обслуговують аналізуемому зупинку [1].

До того ж в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних мають бути визначені номери маршруток для подачі таким чином, щоб розвантаження зупинок здійснювалося рівномірно на протязі всього маршруту певного номеру. Ситуація ускладнюється тим, що:

- по-перше, довжина маршрутів міського автотранспорту суттєво різняться – від 15 км до 30 км [2];
- по-друге, не на всіх зупинках на теперішній час встановлено IP-камери, оскільки навіть в обласних центрах України системи «Розумне місто» тальки набувають свого розвитку [3; 4];
- по-третє, зупинки міського автотранспорту знаходяться у різних адмінрайонах міста та обслуговуються різними транспортними компаніями. Тобто, рішення про місткість та номер маршруту автотранспорту буде прийматися диспетчерами різних районів та/або різних перевізників.

Таким чином, поставлену задачу можна класифікувати як таку, що може бути вирішена із використанням математичного апарату групових експертних оцінок (ЕО) на основі метрик теорії свідочств [5–7].

Аналіз групових ЕО спрямований, перш за все, на визначення ступеня їх узгодженості, за результатами якої формуються колективні рішення між диспетчерами різних адмінрайонів міста та компаній-перевізників щодо подачі автотранспорту на зупинки в залежності від наповненості їх пасажирями. Проте, досить часто в складі групи експертів присутні такі, чиї оцінки за величиною можуть відрізнятися від оцінок основної групи. Присутність таких оцінок в загальній сукупності групових ЕО порушує її однорідність (узгодженість).

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Експертні опитування можуть привести до різних результатів, зважаючи на те, що одні експерти легко висувають нові ідеї, інші схильніші критично аналізувати ідеї інших. У звичайних дискусіях обидві категорії експертів виступають разом і, як правило, заважають одна одній.

В результаті різниці оцінок в загальній сукупності групових ЕО порушує її однорідність (узгодженість). Внаслідок цього виникає задача розбиття експертної групи на кілька підгруп експертів з близькими (узгодженими) оцінками, для подальшого їх аналізу та пошуку агрегованої оцінки [8].

При вирішенні вказаної задачі та вибору відповідних методів її рішення слід враховувати наступні чинники [9]:

- вид шкали експертних вимірювань (номінальна, порядкова, абсолютна, інтервальна та ін.);
- обмеженість кількості експертів  $n$  ( $n \leq 30$ ) в групах; різні види НЕ-факторів (неповнота, невизначеність, нечіткість, недостовірність, неоднозначність та ін.), під впливом яких формуються і обробляються експертні свідочства.

Аналіз методів, які можуть бути застосовані для вирішення задачі структуризації (розбиття) групових ЕО на підгрупи, що містять однорідні в певному сенсі ЕО, показав, що їх ефективна реалізація не завжди можлива. Наприклад, при аналізі ЕО, сформованих в рамках числових шкал (абсолютної, бальної), широкого застосування набули:

- методи кластер-аналізу, в основу яких покладено визначення функцій відстані, наприклад, відстань Евкліда, Манхеттенська відстань, відстань Чебишева та ін.;
- кластеризація на основі методів математичного програмування (динамічного, цілочисельного);
- кластеризація на основі оцінювання функцій щільності розподілу ймовірностей.

Для аналізу ЕО, сформованих в шкалах відношень або порядку, можуть бути використані методи кластеризації нечислових даних, наприклад, метод медіани Кемені [10]. Обґрунтований вибір і використання розглянутих методів рішення задачі розбиття групових ЕО з метою пошуку однорідних підгруп, може бути здійснений за умови коректного врахування різних видів НЕ-факторів, що виникають в процесі отримання та обробки експертної інформації [6]. Також необхідно брати до уваги можливу структуру експертних свідочств (узгоджені, сумісні, довільні та ін.), враховувати можливі способи їх взаємодії (перетин, об'єднання, поглинання). Для вирішення зазначеної проблеми ефективні результати можуть бути отримані при використанні метрик теорії свідочств Демпстера-Шефера [11; 12]. Для покращення вимірювання конфліктів у межах системи Демпстера-Шефера необхідно вдосконалювати існуючі та розроблювати нові алгоритми кількісної оцінки міжекспертної схожості та встановлення порогів консенсусу [13]. Безумовно, при існуванні великих множин групових ЕО обчислення заходів довіри може виявитися громіздким [14]. Але слід враховувати, що правило Демпстера використовує суб'єктивні ймовірності на відміну від об'єктивних ймовірностей при застосуванні теореми Байеса, тому обчислювальні витрати будуть значно меншими.

Метою дослідження є синтез математичної моделі управління невизначеностями шляхом подальшого розвитку методу групових ЕО з використанням метрик теорії свідочств та розробка інноваційної інформаційно-комп'ютерної технології (ІКТ) підтримки прийняття рішень з реалізацією зазначеного методу у складі автоматизованої системи подачі міського автотранспорту на основі підрахунку кількості пасажирів на зупинках за даними IP-відеоспостереження комп'ютерної системи «Розумне місто».

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Припустимо, задана множина альтернатив  $A = \{A_i \mid i = \overline{1, n}\}$  та група експертів  $E = \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$ , що здійснюють експертизу. Тоді, за результатами експертного опитування, буде сформована система підмножин  $B = \{B_j \mid j = \overline{1, t}\}$ , де  $B_j$  являє собою  $2^A$ -вимірний вектор, що відображає переваги (вибір) експерта  $E_j$ , кожний елемент  $x_j$  якого побудовано на основі системи правил виду:

$$\begin{cases} x_j = \{\emptyset\}; \\ x_j = \{\omega_i\} - \text{експертом обрано (оцінено) один елемент } \omega_i \in \Omega; \\ x_j = \{\omega_i \mid i = \overline{1, k}\}, k < n - \text{експертом виділено } k \text{ елементів } \omega_i \in \Omega; \\ x_j = \Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\} - \text{у експерта виникли труднощі із оцінюванням} \\ \text{вибором (всі елементи множини } \Omega \text{ рівнозначні)}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\emptyset$  – порожня множина;  $\Omega$  – сукупність всіх можливих підмножин;  $\omega_i$  – підмножина множини  $\Omega$ .

Необхідно виділити в загальній сукупності ЕО такі підгрупи експертів  $E \Rightarrow \{G_1\}, \{G_2\}, \dots, \{G_j\}, \dots, \{G_t - 1\}$  ( $G_p \subseteq E, \{G_p\} = \{E_1, \dots, E_r\}, t \geq r \geq 1$ ), що мають схожу думку (експертні свідощтва) та визначити таких  $E_j$ , які не належатимуть жодній з таких підгруп, тобто  $E_j \not\subseteq G_k, E_j \subseteq G_k$ , за умови, що  $|G_k| = 1$  (якщо такі мають місце). Будемо вважати, що експертні свідощтва, які потрапили до однієї групи  $E_j \subseteq G_p, t \geq j \geq 2$  є узгодженими; експертні свідощтва  $E_j \subseteq G_k, |G_k| = 1$  є нетиповими, тобто такими, що відрізняються (конфлікують) від решти оцінок експертів. Якщо виникає ситуація, при якій утворюється  $t$  підгруп, таких, що  $\forall G_j : |G_j| = 1 (i = \overline{1, n})$ , то немає сенсу проводити подальшу обробку (аналіз) оцінок експертів.

Для вирішення поставленої задачі, застосуємо підхід, що полягає в наступному. Поділ експертної комісії на підгрупи, всередині яких думки експертів можуть бути признані узгодженими відбувається в два послідовних етапи. На першому етапі оцінюється ступінь схожості експертних свідощтв. Оскільки експертні свідощтва не можна виразити числовим показником, то встановити приналежність вихідних об’єктів (експертів) до будь-яких груп (класів) можна тільки на основі їх подібності між собою. В роботі оцінюється ступінь схожості експертних свідощтв на основі метрик теорії свідощтв. Таким чином для кожної пари  $\langle m_i, m_j \rangle; i, j = \overline{1, t}; i \neq j$  визначаються оцінки однієї з метрик (2)–(7), в яких відстань  $d(m_1, m_2) \in [0; 1]$  є мірою відмінності між двома групами свідощтв:

а) відстань Тессема (Tessera’s distance) [15]:

$$d_T(m_1, m_2) = \max_{A_i \in A} \{|BetP_1(A_i) - BetP_2(A_i)|\}, \quad (2)$$

де пігністична ймовірність  $BetP_m(A_i) = \sum_{\substack{B \subseteq A \\ A_i \in B}} \frac{1}{|B|} \frac{m(B)}{(1-m(\emptyset))}$  [16];

б) відстань Джоссельме (Jousselme distance) [16–18]:

$$d_J(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2}(m_1 - m_2)^T D(m_1 - m_2)}, \quad (3)$$

де  $(m_1 - m_2)$  – різниця векторів;  $D$  – матриця  $2^{|\Omega|} \times 2^{|\Omega|}$ , елементи якої визначаються як

$$D(B_i, B_j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } B_i = B_j; \\ S(B_i, B_j), & \forall B_i, B_j \in A \end{cases} \quad (4)$$

в) Евклідова відстань (Euclidean distance) [19]:

$$d_E(m_1, m_2) = \sqrt{\sum_{B \subseteq A} [(m_i(B) - m_j(B))]^2}; \quad (5)$$

г) відстань Бхаттачарія (Bhattacharyya distance) [18; 20]:

$$d_B(m_1, m_2) = \left[ 1 - \sum_{B \subseteq A} \sqrt{m_i(B) \times m_j(B)} \right]^k, k > 0; \quad (6)$$

д) відстань Ванга (Wang distance) [21]:

$$d_W(m_1, m_2) = \sum_{B \subseteq A} \frac{|m_i(B) - m_j(B)|}{2}. \quad (7)$$

Результати зберігаються у формі матриці парних відстаней, яка є симетричною відносно головної діагоналі виду:

$$\begin{bmatrix} - & d(m_1, m_2) & \dots & d(m_1, m_t) \\ d(m_1, m_2) & - & \dots & d(m_2, m_t) \\ \dots & \dots & - & \dots \\ d(m_2, m_t) & d(m_2, m_t) & \dots & - \end{bmatrix}, \tag{8}$$

де  $d(m_i, m_j) = d(m_j, m_i); \forall i, j = \overline{1, t}; i \neq j; t$  – кількість порівнюваних елементів (об’єктів);  $d(m_i, m_j)$  – відповідні значення однієї з метрик (2)–(7).

Вибір метрики є одним з основних факторів, що впливають на результати розбиття вихідної сукупності експертних свідочств і формування підгруп експертів з досить близькими оцінками. Як правило, вибір метрики, в достатній мірі є суб’єктивним і визначається експертом (аналітиком) самостійно на основі власного досвіду.

На другому етапі формуються підгрупи експертів  $G_p \subseteq E; p = \overline{1, t}$ , де  $[\cdot]$  відповідає цілій частині. Результуючі підгрупи експертів формуються таким чином, що  $E_j \subseteq G_p; j = \overline{1, r}; t \geq r \geq 1$  виконується умова  $\forall i, j = \overline{1, t}; i \neq j; l_{p-1} < d(m_i, m_j) \leq l_p$ , де  $l_{p-1}, l_p$  – деякі заздалегідь відомі порогові значення, які відповідають за приналежність експерта  $E_j$  до підгрупи  $G_r$ .

Розглянемо приклад практичного застосування запропонованого підходу. Припустимо задана множина вихідних даних (альтернатив)  $A = \{A_i | i = \overline{1, n}\}; n = 4$  і група експертів  $E = \{E_i | j = \overline{1, t}\}; t = 10$ . За результатами проведення експертного опитування сформувалась система підмножин  $X_j = \{B_i | i = \overline{1, s}\}; s = 2^{|A|}$ , що відображає вибір експертів (експертні переваги, свідочства). Розглянемо ситуацію при якій експертні свідочства задовольняють умові

$$X_1 = X_2 = \dots X_j = \dots = X_m; X_j = 1; \forall j = \overline{1, m}, \tag{9}$$

тобто, всі експерти обрали одну й ту саму альтернативу, як кращий вибір, і признані еквівалентними  $B_1 = \{a_1\}, B_2 = \{a_2\}, B_3 = \{a_3\}, B_4 = \{a_4\}$ . Результати експертного опитування наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні маси ймовірності виділених підмножин  $m_j(A_i)$

Експерт $E_j$	$m_j(A_1)$	$m_j(A_2)$	$m_j(A_3)$	$m_j(A_4)$
$E_1$	0,1	0,5	0,3	0,1
$E_2$	0,2	0,3	0,4	0,1
$E_3$	0,3	0,2	0,2	0,3
$E_4$	0,5	0,1	0,1	0,3
$E_5$	0,1	0,1	0,6	0,2
$E_6$	0,1	0,3	0,2	0,4
$E_7$	0,3	0,1	0,4	0,2
$E_8$	0,3	0,3	0,3	0,1
$E_9$	0,1	0,2	0,1	0,6
$E_{10}$	0,1	0,6	0,2	0,1

Сформуємо набір метрик  $Q = \{Q_i | i = \overline{1, k}\}; k = 5$ , на основі якого дослідимо ступінь відмінності експертних свідочств, та чутливість показника ступеню відмінності (близькості) між групами експертних свідочств  $m_1$  та  $m_2$  до застосованої метрики. Дослідимо можливість застосування наступних метрик:  $k_1$  – відстань Джоссельме;  $k_2$  – відстань Евкліда;  $k_3$  – відстань Ванга;  $k_4$  – відстань Бхаттачарія;  $k_5$  – відстань Тессема. Для визначення порядку їх групування скористаємося методом дальнього сусіда.

Розрахуємо значення метрик (2)–(7), що характеризують міру відмінності між виділеними групами експертних свідочств.

Квадратна матриця (порядку 10) попарних відстаней, отриманих на основі метрики (6), для системи підмножин  $B$ , сформованих групою експертів на множині  $A$ , наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Попарне представлення значень метрики  $d_B(m_k, m_j)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0,158	0,304	0,454	0,333	0,260	0,340	0,199	0,407	0,086
2	0,158	–	0,232	0,371	0,232	0,275	0,201	0,093	0,411	0,227
3	0,304	0,232	–	0,173	0,307	0,188	0,175	0,192	0,247	0,327
4	0,454	0,371	0,173	–	0,432	0,340	0,260	0,305	0,333	0,466
5	0,333	0,232	0,307	0,432	–	0,312	0,192	0,296	0,409	0,409

Продовження таблиці 2

6	0,260	0,275	0,188	0,340	0,312	–	0,296	0,286	0,154	0,275
7	0,340	0,201	0,175	0,260	0,192	0,296	–	0,197	0,373	0,397
8	0,199	0,093	0,192	0,305	0,296	0,286	0,197	–	0,405	0,240
9	0,407	0,411	0,247	0,333	0,409	0,154	0,373	0,405	–	0,409
10	0,086	0,227	0,327	0,466	0,409	0,275	0,397	0,240	0,409	–

Розрахуємо значення міри (10), що відображає ступінь конфлікту між експертом  $E_j$  та рештою  $(t - 1)$  експертів  $E \setminus E_j$  [22]:

$$Conf(i, E) = \frac{1}{t-1} \sum_{i=1; i \neq j}^t Conf(i, j), \tag{10}$$

де  $E = \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$  – група експертів, які залучені в конфлікт з експертом  $E_i$ .  
Результати розрахунків наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Попарне представлення значень метрики  $d_B(m_k, m_j)$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0.158	0.304	0.454	0.333	0.26	0.34	0.199	0.407	0.086
2	0.158	–	0.232	0.371	0.232	0.275	0.201	0.093	0.411	0.227
3	0.304	0.232	–	0.173	0.307	0.188	0.175	0.192	0.247	0.327
4	0.454	0.371	0.173	–	0.432	0.34	0.26	0.305	0.333	0.466
5	0.333	0.232	0.307	0.432	–	0.312	0.192	0.296	0.409	0.409
6	0.26	0.275	0.188	0.34	0.312	–	0.296	0.286	0.154	0.275
7	0.34	0.201	0.175	0.26	0.192	0.296	–	0.197	0.373	0.397
8	0.199	0.093	0.192	0.305	0.296	0.286	0.197	–	0.405	0.24
9	0.407	0.411	0.247	0.333	0.409	0.154	0.373	0.405	–	0.409
10	0.086	0.227	0.327	0.466	0.409	0.275	0.397	0.24	0.409	–

Аналізуючи дані табл. 4 можна дійти до висновку, про те, що незалежно від обраної метрики свідочтва експерта  $E_9$  є самими конфліктними по відношенню до свідочств решти експертної групи (рівень конфлікту між експертом  $E_9$  та рештою експертної групи коливається в діапазоні [0,35; 0,53], в залежності від застосованої метрики, та його значення є суттєвим).

Метрика (7) – відстань Ванга – виділяє експерта  $E_4$  з таким самим показником рівня конфлікту як і у  $E_9$ . Найменш конфліктними по відношенню до решти групи експертів признані оцінки експерта  $E_3$ , рівень конфлікту коливається в діапазоні [0,238; 0,339] (окрім метрики (2) – відстані Тессема). Метрика (7) виділяє експертів  $E_3$ ,  $E_8$  з найменшим рівнем конфлікту; метрика (2) – експертів  $E_2$  та  $E_8$ .

Таблиця 4

Значення міри  $Conf(E_j, E)$

$Conf(E_j, E)$	Відстань Джоссельме	Відстань Евкліда	Відстань Ванга	Відстань Бхатгачарія	Відстань Тессема
$Conf(E_1, E)$	0,290	0,411	0,344	0,282	0,311
$Conf(E_2, E)$	0,245	0,347	0,300	0,244	<b>0,256</b>
$Conf(E_3, E)$	<b>0,240</b>	<b>0,339</b>	<b>0,289</b>	<b>0,238</b>	0,267
$Conf(E_4, E)$	0,350	0,496	<b>0,433</b>	0,348	0,356
$Conf(E_5, E)$	0,349	0,493	0,378	0,325	0,378
$Conf(E_6, E)$	0,267	0,377	0,311	0,265	0,289
$Conf(E_7, E)$	0,266	0,377	0,322	0,270	0,289
$Conf(E_8, E)$	0,241	0,341	<b>0,289</b>	0,246	<b>0,256</b>
$Conf(E_9, E)$	<b>0,375</b>	<b>0,530</b>	<b>0,433</b>	<b>0,350</b>	<b>0,422</b>
$Conf(E_{10}, E)$	0,343	0,485	0,367	0,315	0,378

Результуючі підгрупи експертів формувалися за умови, що  $0 < d(m_k, m_j) \leq 0,3$ , що передбачає низький рівень відмінності між групами свідочств  $m_k$  та  $m_j$ , і дозволяє зробити припущення про те, що всередині виділених підгруп оцінки експертів є узгодженими.

За результатами сформованого розбиття вихідної сукупності оцінок групи експертів  $E = \{E_i \mid i = \overline{1, t}\}$  виділені наступні підгрупи експертів:

1) відстань Джоссельме:

$G_1 = \{E_2, E_5, E_7, E_8\}$  – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2, E_7, E_8\}$  та  $\{E_5\}$ , та сягає значення  $d_J(m_k, m_j) = 0,3$ ; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2\}$  та  $\{E_8\}$  при  $d_J(m_i, m_j) = 0,1$ .

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_J(m_k, m_j) = 0,1$ .

$G_3 = \{E_3, E_4\}$  та  $G_4 = \{E_6, E_9\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_J(m_k, m_j) = 0,173$ ;

2) відстань Евкліда:

$G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$  – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2, E_8\}$  та  $\{E_7\}$ , та сягає значення  $d_E(m_k, m_j) = 0,245$ .

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_E(m_k, m_j) = 0,141$ .

$G_3 = \{E_3, E_4\}$  та  $G_4 = \{E_6, E_9\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_E(m_k, m_j) = 0,245$ .

$G_5 = \{E_5\}$  – найближчою підгрупою є  $\{E_2, E_7, E_8\}$ ,  $d_E(m_{G1}, m_{G5}) = 0,424$ ;

3) відстань Ванга:

$G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$  – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_7\}$  та  $\{E_2, E_8\}$ , та сягає значення  $d_W(m_k, m_j) = 0,2$ .

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_W(m_k, m_j) = 0,1$ .

$G_3 = \{E_3, E_4\}$  та  $G_4 = \{E_6, E_9\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_W(m_k, m_j) = 0,2$ ; об'єднання цих підгруп може бути здійснено при  $d_W(m_k, m_j) = 0,4$ .

$G_5 = \{E_5\}$  – найближчою підгрупою є підгрупа  $\{E_1, E_{10}\}$ ,  $d_E(m_{G2}, m_{G5}) = 0,4$ ;

4) відстань Бхаттачарія:

$G_1 = \{E_1, E_2, E_8, E_{10}\}$  – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_1, E_{10}\}$  та  $\{E_2, E_8\}$ , та сягає значення  $d_B(m_i, m_j) = 0,24$ ; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2\}$  та  $\{E_8\}$  при  $d_B(m_i, m_j) = 0,086$ .

$G_2 = \{E_5, E_7\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_B(m_i, m_j) = 0,192$ .

$G_3 = \{E_3, E_4\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_B(m_i, m_j) = 0,173$ .

$G_4 = \{E_6, E_9\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_B(m_i, m_j) = 0,154$ ;

5) відстань Тессема:

$G_1 = \{E_2, E_3, E_4, E_7, E_8\}$  – при формуванні групи максимальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2, E_3, E_7, E_8\}$  та  $\{E_4\}$ , та сягає значення  $d_T(m_i, m_j) = 0,3$ ; мінімальний ступінь відмінності досягається при об'єднанні підгруп  $\{E_2\}$  та  $\{E_8\}$  при  $d_T(m_i, m_j) = 0,1$ .

$G_2 = \{E_1, E_{10}\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_T(m_i, m_j) = 0,1$ .

$G_3 = \{E_6, E_9\}$  – ступінь відмінності сягає значення  $d_T(m_i, m_j) = 0,2$ .

$G_4 = \{E_5\}$  – ступінь відмінності між  $\{E_5\}$  та  $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_6, E_7, E_8\}$  сягає значення  $d_T(m_i, m_j) = 0,5$ .

За результатами отриманих даних можна дійти до висновку, що незалежно від застосованої метрики, відокремлюється підгрупа  $\{E_6, E_9\}$  зі значенням ступеню відмінності, який коливається у межах від 0,154 до 0,245 (в залежності від обраної метрики). Результати, отримані за метриками (5) – відстань Евкліда – та (7) – відстань Ванга, – співпадають. Відмінність полягає у кількісних значеннях показника  $d(m_i, m_j)$  для цих метрик.

Метрики (3), (5), (6) та (7) виділяють підгрупу  $\{E_3, E_4\}$  зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,173 до 0,245 (в залежності від обраної метрики). Метрика (2) відносить цю підгрупу до підгрупи  $\{E_2, E_3, E_4, E_7, E_8\}$ :

–  $\{E_4\}$  об'єднується із  $\{E_2, E_3, E_7, E_8\}$  при  $d_T(m_i, m_j) = 0,3$ ;

–  $\{E_3\}$  об'єднується із  $\{E_2, E_7, E_8\}$  при  $d_T(m_i, m_j) = 0,2$ .

Метрики (2), (3), (5) та (7) виділяють підгрупу  $\{E_1, E_{10}\}$  зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,1 до 0,141 (в залежності від обраної метрики). Метрика (5) відносить підгрупу  $\{E_1, E_{10}\}$  до підгрупи  $\{E_1, E_2, E_8, E_{10}\}$ :  $\{E_1, E_{10}\}$  та  $\{E_2, E_8\}$  об'єднуються при  $d_B(m_i, m_j) = 0,24$ .

Метрики (2), (5) та (7) виділяють підгрупу  $\{E_5\}$  зі значенням ступеню відмінності, який коливається в межах від 0,4 до 0,5 (в залежності від обраної метрики).

Таким чином, при встановлених граничних значеннях  $d(m_k, m_j)$ , експертна комісія була розбита на ряд підгруп  $E \Rightarrow \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ , які містять близькі, в певному сенсі, значення, де  $G_1 = \{E_2, E_7, E_8\}$ ;  $G_2 = \{E_1, E_{10}\}$ ;  $G_3 = \{E_3, E_4\}$ ;  $G_4 = \{E_6, E_9\}$ ;  $G_5 = \{E_5\}$ . В аналізованому прикладі граничне значення, що відповідає за оптимальну кількість підгруп,  $d(m_k, m_j)$  було прийнятим 0,3, що, в свою чергу, передбачає низький рівень відмінності між групами експертних свідств  $m_k$  та  $m_j$ , всередині виділеної групи  $G_i$ .

### Висновки

Розглянута у роботі проблема вибору транспортних засобів для логістичного забезпечення мультимодальних перевезень пасажирів є задачею, що вирішується в умовах невизначеності та нечіткості вихідних даних.

У виконаних дослідженнях набули подальшого розвитку теоретичні положення групових експертних оцінок на основі метрик з використанням математичного апарату теорії свідочств та кластерного аналізу. Доведено, що у разі використання у якості експертів представників (диспетчерів подачі міського транспорту) декількох адмінрайонів міста та/або компаній-перевізників можуть бути використані додаткові процедури для зближення думок різних підгруп. Якщо свідочства експертів стійкі і остаточні – тобто, сформовані з урахуванням позицій всіх учасників процесу, – можливе проведення агрегування експертних свідочств для кожної підгрупи окремо.

*Робота виконана за підтримки Міносвіти та науки України в межах держбюджетної науково-дослідної роботи № держ. реєстрації 0117U007144.*

#### Список використаної літератури

1. Буренко В. О. Аналіз наповненості зупинок пасажирського транспорту за допомогою алгоритмів обробки зображень з IP-камер «розумного міста». *Вісник Хмельн. нац. ун-ту*. 2023. Т. 1, № 5. С. 47–52. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>.
2. Актуальна інформація про громадський транспорт України. *EasyWay*: вебсайт. URL: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/mykolaiv/routes> (дата звернення: 14.04.2024).
3. Маркевич К., Сіденко В. Smart-інфраструктура у сталому розвитку міст: Світовий досвід та перспективи України. Київ: Центр Разумкова; Заповіт, 2021. 400 с. URL: <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> (дата звернення: 14.04.2024).
4. Мураєв С. В. Український досвід впровадження концепції смарт-міст: основні досягнення та проблеми. *Вісник Хмельн. нац. ун-ту*. 2020. № 2. С. 91–96. DOI: 10.31891/2307-5740-2020-280-2-17.
5. Kovalenko I. I., Shved A. V. Clustering of group expert estimates based on measures in the theory of evidence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016, № 4. С. 71–77.
6. Kovalenko I., Shved A. Development of a technology of structuring group expert judgments under various types of uncertainty. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2018. № 3/4 (93). С. 60–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133299.
7. Davydenko Ye. O., Shved A. V., Honcharova N. V. Development of technique for structuring of group expert assessments under uncertainty and inconcistency. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2023. № 4. P. 30–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-4-3.
8. Рудень В. В., Гуртор Т. Г. Методика проведення та оцінки результатів експертних оцінок. *Український медичний часопис*. 2011. № 2 (82)–III/IV. С. 31–34.
9. Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень. Київ: Маклаут, 2008. 444 с.
10. Soltanifar M., Sharafi H., Lotfi F. H., Pedrycz W., Allahviranloo T. Preferential voting and applications: Approaches based on data envelopment analysis. Springer, 2023. 185 p.
11. Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М. Оптимізація процесу оцінювання в умовах невизначеності на основі структуризації предметної області та аксіоми незміщеності. *Штучний інтелект*. 2008. № 3. С. 217–223.
12. Shafer G. A. A mathematical theory of evidence. Princeton, NJ, United States: Princeton University, Dec. 1976. DOI:10.1515/9780691214696.
13. Liu Qia., Liu Qin., Wang M. Sustainable decision-making enhancement: trust and linguistic-enhanced conflict measurement in evidence theory. *Sustainability*. Mar. 2024. Vol. 16 (6):2288. DOI: 10.3390/su16062288.
14. Wang X., Qin J. Multimodal recommendation algorithm based on Dempster-Shafer evidence theory. *Multimedia Tools and Applications*. Sept. 2023. Vol. 83, Is. 10. P. 1–16. DOI:10.1007/s11042-023-15262-8.
15. Zhang Z., Xiao F. An information-volume-based distance measure for decision-making. *Chinese Journal of Aeronautics*. May 2023. Vol. 36, Is. 5. P. 392–405. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.007.
16. Топольницький М. В., Шишацький А. В. Метод комплексування об'єктивних та суб'єктивних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку*: матеріали XXI-ої Міжнародної наук.-практ. конф., Дебрецен, Угорщина, 07 червня 2022 р. С. 107–112.
17. Jousselme A.-L., Maupin P. Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations. *International Journal of Approximate Reasoning*. Feb. 2012. Vol. 53, Is. 2. P. 118–145.
18. Jie Z., Rui X., Zhenning D., Deyu T., Wenhong W. Evaluating the reliability of sources of evidence with a two-perspective approach in classification problems based on evidence theory. *Information Sciences*. 2020. Vol. 507. P. 313–338. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.033.
19. Han D. Q., Deng Y., Han C. Z., Yang Yi. Some notes on betting commitment distance in evidence theory. *Science China. Information Sciences*. 2012. Vol. 55. P. 558–565. DOI: 10.1007/s11432-011-4541-z.
20. Xiahou T., Zeng Z., Liu Yu, Huang H.-Z. Measuring conflicts of multisource imprecise information in multistate system reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*. July 2021. Vol. 99. P. 1–18. DOI: 10.1109/TR.2021.3087531.
21. Zhu Jin., Luo Yu., Zhou Jia. Sensor reliability evaluation scheme for target classification using belief function theory. *Sensors*. 2013. Vol. 13. P. 17193–17221. DOI: 10.3390/s131217193.
22. Martin A., Jousselme A. L., Osswald C. Conflict measure for the discounting operation on belief functions. Proc. of the 11th Internat. Conf. on Information Fusion (*FUSION 2008*). Cologne, Germany, 30 June–3 July 2008. P. 1–8.

## References

1. Burenko V. O. (2023) Analiz napovnenosti zupynok pasazhyrskoho transportu za dopomohoiu alhorytmiv obrobky zobrazen z IP-camer «rozumnoho mista» [Analysis of the occupancy of passenger transport stops using image processing algorithms from IP cameras of the "Smart city"]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 1, no. 5, pp. 47–52. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5>. (in Ukrainian)
2. EasyWay Team (2024) Aktualna informacia pro hromadskyj transport Ukrainy [Actual information about public transport of Ukraine]. *EasyWay* : web site. Retrieved from: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/mykolaiv/routes> (accessed 14 April 2024).
3. Markevych K., Sidenko V. (2021) *Smart-infrastruktura u stalomu rozvytku mist: Svitovi dosvid ta perspektyvy Ukrainy* [Smart infrastructure in the sustainable development of cities: World experience and prospects of Ukraine]. Kyiv: Razumkov Center; Zapovit, 2021. (in Ukrainian)
4. Muraiev Ye. V. (2020) Ukrainyskyi dosvid vprovadzhennia kontsepcii smart-mist: osnovni dosiahnennia ta problemy [Ukrainian experience of implementing the concept of Smart cities: main achievements and problems]. *Herald of Khmelnytskyi National University*, no. 2, pp. 91–96. DOI: 10.31891/2307-5740-2020-280-2-17. (in Ukrainian)
5. Kovalenko I. I., Shved A. V. (2016) Clustering of group expert estimates based on measures in the theory of evidence. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 4, pp. 71–77.
6. Kovalenko I., Shved A. (2018) Development of a technology of structuring GE judgments under various types of uncertainty. *East. European Jnl of Adv. Technol.*, no. 3/4 (93), pp. 60–68. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133299.
7. Davydenko Ye. O., Shved A. V., Honcharova N. V. (2023) Development of technique for structuring of group expert assessments under uncertainty and inconsistency. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 4. pp. 30–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-4-3.
8. Ruden V. V., Hutor T. H. (2011) Metodyka provedennia ta otsinky rezultativ ekspertnykh otsinok [Methods of conducting and evaluating the results of expert evaluations]. *Ukr. Med. Jnl*, no. 2 (82)–III/IV, pp. 31–34. (in Ukrainian)
9. Hnatiienko H. M., Snytiuk V. Ye. (2008) *Ekspertni tekhnologii pryiniattia rishen* [Expert decision-making technologies]. Kyiv: McLaut. (in Ukrainian)
10. Soltanifar M., Sharafi H., Lotfi F. H., Pedrycz W., Allahviranloo T. (2023) *Preferential voting and applications: Approaches based on data envelopment analysis*. Berlin, Germany: Springer.
11. Snytiuk V. Ye., Hnatiienko H. M. (2008) Optymizatsiia protsesu otsiniuvannia v umovakh nevyznachenosti na osnovi strukturyzatsii predmetnoi oblasti ta aksiomy nezmishchenosti [Optimization of the evaluation process under conditions of uncertainty based on the structuring of the subject area and the axiom of immutability]. *Artificial Intelligence*, no. 3, pp. 217–223. (in Ukrainian)
12. Shafer G. A. (Dec. 1976) *A mathematical theory of evidence*. Princeton, NJ, United States: Princeton University. DOI:10.1515/9780691214696.
13. Liu Qia., Liu Qin., Wang M. (Mar. 2024) Sustainable decision-making enhancement: trust and linguistic-enhanced conflict measurement in evidence theory. *Sustainability*, vol. 16 (6):2288. DOI: 10.3390/su16062288.
14. Wang X., Qin J. (Sept. 2023) Multimodal recommendation algorithm based on Dempster-Shafer evidence theory. *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, no. 10, pp. 1–16. DOI:10.1007/s11042-023-15262-8.
15. Zhang Z., Xiao F. (May 2023) An information-volume-based distance measure for decision-making. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 36, no. 5, pp. 392–405. DOI: 10.1016/j.cja.2022.11.007.
16. Topolnytskyi M. B., Shyshatskyi A. B. Metod kompleksuvannia obiektyvnykh ta subiektyvnykh danykh na osnovi teorii svidchen Dempstera–Sheifera [The method of combining objective and subjective data based on the Dempster-Shafer theory of evidence]. *Modern aspects of the modernization of science: state, problems, development trends* : Proc. of the XXI Internat. Sci.-Pract. Conf., Debrecen, Hungary, 07 June 2022, pp. 107–112. (in Ukrainian)
17. Jousselme A.-L., Maupin P. (Feb. 2012) Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 53, no. 2, pp. 118–145.
18. Jie Z., Rui X., Zhenning D., Deyu T., Wenhong W. (2020) Evaluating the reliability of sources of evidence with a two-perspective approach in classification problems based on evidence theory. *Information Sciences*, vol. 507, pp. 313–338. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.033.
19. Han D. Q., Deng Y., Han C. Z., Yang Yi. (2012) Some notes on betting commitment distance in evidence theory. *Science China. Information Sciences*, vol. 55, pp. 558–565. DOI: 10.1007/s11432-011-4541-z.
20. Xiahou T., Zeng Z., Liu Yu, Huang H.-Z. (July 2021) Measuring conflicts of multisource imprecise information in multistate system reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 99, pp. 1–18. DOI: 10.1109/TR.2021.3087531.
21. Zhu Jin., Luo Yu., Zhou Jia. (2013) Sensor reliability evaluation scheme for target classification using belief function theory. *Sensors*, vol. 13, pp. 17193–17221. DOI: 10.3390/s131217193.
22. Martin A., Jousselme A. L., Osswald C. (2008) Conflict measure for the discounting operation on belief functions. Proc. of the 11th Internat. Conf. on Information Fusion (*FUSION 2008*), Cologne, Germany, 30 June–3 July 2008, pp. 1–8.