

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ ПЕРЕХРЕСНОГО ВПЛИВУ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПЕРЕДБАЧЕННЯ

Д.Є. ПИЛИПЕНКО

Досліджено дію якісних властивостей вхідних даних на результати використання методу аналізу перехресного впливу. Запропоновано методологію розрахунку коефіцієнта достовірності результатів його використання.

ВСТУП

Роботи по розв'язанню задач технологічного передбачення проводяться вже понад 30 років у більше ніж 40 країнах світу в міждержавних, національних, регіональних та комерційних програмах. Самим відповідальним етапом будь-якого проекту з технологічного передбачення є етап попереднього вивчення проблеми: перше осмислення та генерування різноманітних ідей, їх кластеризація, відбір «конструктивних» кластерів, глибоке детальне вивчення ідей для кожного кластера, генерування для вибраного кластера та розділення на групи відповідно до часового горизонту [1]. Інформація, на яку не було звернуто увагу під час попереднього етапу, не буде враховуватись при проведенні побудови альтернатив сценаріїв, а тому може призвести до великої похибки у результатах.

Одним з методів, що може використовуватись на попередньому етапі проекту технологічного передбачення, є метод аналізу перехресного впливу, запропонований Теодором Гордоном (Theodore Gordon) та Олафом Хелмером (Olaf Helmer) у 1966 р. [2].

Вхідними даними для використання методу аналізу перехресного впливу є висновки експертів або аналітиків, які залучені до розв'язання конкретних задач технологічного передбачення. Такі висновки завжди здійснюються на підставі знань, досвіду, інтуїції та здорового глузду професіоналів. Тому всі результати, отримані за допомогою методу аналізу перехресного впливу, є лише наближеннями, або апроксимаціями, до того, що має відбутися реально [3].

Логічно постає питання, наскільки можна покладатися на результати аналізу перехресного впливу при прийнятті стратегічних та тактичних рішень і яким чином співвідносити результати використання даного методу з іншими методами проекту технологічного передбачення. Найкраще уявлення про це може дати математична оцінка коефіцієнта достовірності результатів такого аналізу.

Мета цієї роботи — дослідження дії якісних властивостей вхідної інформації при використанні методу аналізу перехресного впливу у проектах

технологічного передбачення, розробка методики кількісного оцінювання

цих властивостей та їх дію на результати дослідження, мінімізації цієї дії і розрахунок коефіцієнта достовірності результатів використання методу аналізу перехресного впливу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При використанні методу аналізу перехресного впливу в якості вхідних даних використовуються множина ймовірних майбутніх ключових подій, масиви експертних оцінювань апріорних та апостеріорних ймовірностей подій:

$E = \{E_j | j = \overline{1, N}\}$ — множина ймовірних майбутніх ключових подій, де

N — загальна кількість ключових подій, що досліджуються;

$Q = \{Q_i | i = \overline{1, M}\}$ — множина експертів, де M — загальна кількість

експертів, які приймають участь у проекті технологічного передбачення;

$W = \{w_i | i = \overline{1, M}\}$ — множина коефіцієнтів довіри до компетенції експертів, де $w_i \in (0, 1]$ — коефіцієнт довіри до експерта Q_i (надається замовником дослідження при формуванні експертної групи);

$\hat{p}_i(E_j) \in [0, 1]$ — оцінка апріорної ймовірності ключової події E_j (надається експертом Q_i);

$\hat{p}_i(E_j / E_k) \in [0, 1]$ — оцінка апостеріорної ймовірності ключової події

E_j за умови E_k (надається експертом Q_i);

$\hat{p}(E_j) = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{p}_i(E_j) w_i}{\sum_{i=1}^M w_i} \in [0, 1]$ — середньозважена експертна оцінка апрі-

орної ймовірності події E_j ;

$\hat{p}(E_j / E_k) = \frac{\sum_{i=1}^M \hat{p}_i(E_j / E_k) w_i}{\sum_{i=1}^M w_i} \in [0, 1]$ — середньозважена експертна

оцінка апостеріорної ймовірності ключової події E_j за умови E_k ;

$\text{Odds}(p) = \frac{p}{1-p}$ — «співвідношення шансів» («Odds Ratio» [2]) на-

стання події з ймовірністю p .

На базі масивів експертних оцінок будується матриця перехресного впливу (табл. 1).

При підготовці матеріалів для цієї статті методика розрахунку оцінки достовірності відпрацьовувалась на великій кількості модельних прикладів. У табл. 2 показано матрицю перехресного впливу десяти подій (наведено середньозважені значення експертних оцінок).

Таблиця 1. Формат матриці перехресного впливу

Подія	Ймовірність події	Апостеріорна ймовірність події			
		E_1	E_2	...	E_N
E_1	$\hat{p}(E_1)$...	$\hat{p}(E_2 / E_1)$...	$\hat{p}(E_N / E_1)$
E_2	$\hat{p}(E_2)$	$\hat{p}(E_1 / E_2)$	$\hat{p}(E_N / E_2)$
.....
E_N	$\hat{p}(E_N)$	$\hat{p}(E_1 / E_N)$	$\hat{p}(E_2 / E_N)$

Таблиця 2. Приклад заповнення матриці перехресного впливу

Подія	Ймовірність	Ймовірність після калібрування	Апостеріорна ймовірність події									
			E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
E_1	0,71	0,712	0,71	0,37	0,71	0,49	0,84	0,17	0,38	0,88	0,68	0,48
E_2	0,39	0,388	0,85	0,39	0,59	0,58	0,86	0,15	0,45	0,94	0,58	0,22
E_3	0,51	0,501	0,74	0,17	0,51	0,60	0,71	0,05	0,45	0,90	0,31	0,49
E_4	0,35	0,346	0,85	0,25	0,51	0,35	0,60	0,07	0,48	0,86	0,42	0,38
E_5	0,68	0,673	0,69	0,39	0,47	0,30	0,68	0,15	0,36	0,81	0,65	0,44
E_6	0,13	0,134	0,69	0,25	0,73	0,42	0,58	0,13	0,41	0,94	0,79	0,26
E_7	0,34	0,336	0,74	0,60	0,71	0,51	0,77	0,17	0,34	0,83	0,80	0,57
E_8	0,87	0,875	0,70	0,42	0,48	0,33	0,78	0,12	0,38	0,87	0,61	0,39
E_9	0,58	0,586	0,81	0,33	0,43	0,42	0,74	0,22	0,14	0,78	0,58	0,19
E_{10}	0,38	0,370	0,83	0,58	0,69	0,42	0,77	0,07	0,25	0,93	0,54	0,38

Як міру недостовірності результатів аналізу перехресного впливу будемо використовувати відносну зміну «співвідношення шансів» подій після калібрування матриці у результаті зміни вхідних даних у межах інтервалу довіри.

ЯКІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

При вивченні алгоритму методу аналізу перехресного впливу [2] та практичному його використанні було виявлено низку властивостей вхідних даних, які можуть істотно вплинути на достовірність результатів використання методу та проекту технологічного передбачення в цілому.

При використанні цього методу обсяг роботи експертів та технічна складність розрахунків росте за квадратичним законом, тому для аналізу обираються лише такі події, що за попередньою оцінкою експертів мають достатні ймовірність та вплив на систему (значення оцінки ймовірності та

впливу перевищують поріг, який задається для кожного дослідження окремо). Події з низькими ймовірністю або впливом не враховуються, проте за певних умов можуть істотно вплинути на результати калібрування матриці.

Кожному значенню апіорної та апостеріорної ймовірності, яке використовується у методі аналізу перехресного впливу, кожен експерт надає власну оцінку, яка може значно відрізнитися від оцінок інших експертів, тому загальна оцінка апіорних та апостеріорних ймовірностей ключових подій є нечіткою змінною.

Крім того, на достовірність результатів використання методу аналізу перехресного впливу діє кількість ітерацій методу Монте-Карло, яка була виконана при калібруванні матриці перехресного впливу. Виконання невеликої кількості ітерацій призводить до істотної похибки у отриманих результатах.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОХИБКИ У АПІОРНІЙ ЙМОВІРНСТІ

При оцінці апіорних ймовірностей ключових подій кожен експерт надає власне значення $\hat{p}(E_j)$, тому $p(E_j)$ потрібно розглядати як нечітке число із множиною приналежності, яка відповідає гістограмі експертних оцінок. Проте, метод аналізу перехресного впливу використовує лише середньозважене значення оцінки апіорної ймовірності, що може призвести до похибки у результатах дослідження.

Для оцінки згаданої вище похибки необхідно спочатку обчислити оцінку середньоквадратичного відхилення множини експертних оцінок значення $p(E_j)$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{M \sum_i (\hat{p}_i(E_j))^2 - (\sum_i \hat{p}_i(E_j))^2}{M(M-1)}} \in [0,1).$$

Відповідно, за інтервал довіри ймовірності $\hat{p}(E_j)$ приймемо

$$p(E_j) \in [\hat{p}(E_j) - \sigma_j, \hat{p}(E_j) + \sigma_j].$$

Наступним кроком оцінки дії неточності середньозваженої оцінки апіорної ймовірності події ($\hat{p}(E_j)$) на результати аналізу перехресного впливу є дослідження зміни результатів калібрування матриці перехресного впливу після пониження та підвищення кожної ймовірності $\hat{p}(E_j)$ на обчислені значення σ_j .

Після підвищення оцінки ймовірності події E_j не повинна порушуватись узгодженість матриці перехресного впливу, тому її нове значення розраховується у результаті вирішення задачі

$$\hat{p}_H(E_j) = \max(p),$$

$$\begin{cases} p \leq \hat{p}(E_j) + \sigma_j, \\ 0 \leq p \leq 1, \\ \forall i \neq j: 0 \leq \frac{p - \hat{p}(E_i)\hat{p}(E_j / E_i)}{1 - \hat{p}(E_i)} \leq 1, \\ \forall i \neq j: 0 \leq \frac{\hat{p}(E_i) - p\hat{p}(E_i / E_j)}{1 - p} \leq 1. \end{cases}$$

При вивченні цієї задачі виявлено, що вона може бути зведена до

$$\hat{p}_H(E_j) = \min(1; \hat{p}(E_j) + \sigma_j; \min_{i \neq j} (1 - \hat{p}(E_i)(1 - \hat{p}(E_j / E_i))); \min_{i \neq j} (PF(\hat{p}(E_i), \hat{p}(E_i / E_j))));$$

$$\text{де } PF(a, b) = \begin{cases} \frac{a}{b} & \text{за умови } a < b, \\ \frac{1-a}{1-b} & \text{інакше.} \end{cases}$$

Знижене значення оцінки ймовірності події E_j розраховується за допомогою задачі

$$\hat{p}_L(E_j) = \min(p),$$

$$\begin{cases} p \geq \hat{p}(E_j) - \sigma_j, \\ 0 \leq p \leq 1, \\ \forall i \neq j: 0 \leq \frac{p - \hat{p}(E_i)\hat{p}(E_j / E_i)}{1 - \hat{p}(E_i)} \leq 1, \\ \forall i \neq j: 0 \leq \frac{\hat{p}(E_i) - p\hat{p}(E_i / E_j)}{1 - p} \leq 1, \end{cases}$$

що еквівалентно виразу

$$\hat{p}_L(E_j) = \max(0; \hat{p}(E_j) - \sigma_j; \max_{i \neq j} (\hat{p}(E_i)\hat{p}(E_j / E_i))).$$

Після кожної зміни ймовірності виконується повторне калібрування матриці перехресного впливу та проводиться порівняння отриманих ймовірностей подій з початковими.

Оцінка впливу похибки середньозваженої оцінки апіорних ймовірностей подій розраховується за формулою

$$L_1 = \sum_{j=1}^N \frac{\max_{i \neq j} \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}_{j, \text{Low}}(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right) + \max_{i \neq j} \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}_{j, \text{High}}(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right)}{2t_j N},$$

де $t_j \in [1,10]$ — коефіцієнт довіри до експертної оцінки $\hat{p}(E_j)$ (за замовчанням дорівнює 1); $\hat{p}_{j,Low}(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при зниженні $\hat{p}(E_j)$; $\hat{p}_{j,High}(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при підвищенні $\hat{p}(E_j)$. Числові результати розрахунку наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Вплив похибки середньозваженої оцінки апріорних ймовірностей подій

Подія	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
Підвищення, %	3,86	5,67	6,81	6,99	6,99	6,90	6,90	2,54	2,83	3,93
Зниження, %	6,16	4,60	6,33	6,99	4,50	6,90	6,65	3,28	6,74	5,08
max, %	6,99									
L_1 , %	5,53									

Для зниження ймовірного впливу похибки середньозваженої оцінки апріорних ймовірностей подій необхідно провести додаткове обговорення та оцінювання щодо тих ймовірностей, зміна яких найбільше впливає на матрицю перехресного впливу. Уточнення експертної оцінки $\hat{p}(E_j)$ має супроводжуватись відповідним підвищенням коефіцієнта t_j .

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОХИБКИ У АПОСТЕРІОРНІЙ ЙМОВІРНОСТІ

Для оцінки інтервалу довіри апостеріорної ймовірності $\hat{p}(E_i / E_j)$ використовується той же підхід, що й до оцінки $\hat{p}(E_j)$, а оцінка середньоквадратичного відхилення множини експертних оцінок значення апостеріорної ймовірності

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\frac{M \sum_k (\hat{p}_k(E_i / E_j))^2 - (\sum_k \hat{p}_k(E_i / E_j))^2}{M(M-1)}}.$$

Відповідно, за інтервал довіри ймовірності $\hat{p}(E_i / E_j)$ приймаємо

$$p(E_i / E_j) \in [\hat{p}(E_i / E_j) - \sigma_{i,j}, \hat{p}(E_i / E_j) + \sigma_{i,j}].$$

При зміні апостеріорної ймовірності повинна зберегтись узгодженість матриці перехресного впливу, тому підвищена та знижена ймовірності $\hat{p}(E_i / E_j)$ розраховуються за допомогою формул

$$\hat{p}_H(E_i / E_j) = \min \left(\hat{p}(E_i / E_j) + \sigma_{i,j}, \frac{\hat{p}(E_i)}{\hat{p}(E_j)} \right),$$

$$\hat{p}_L(E_i / E_j) = \max \left(\hat{p}(E_i / E_j) - \sigma_{i,j}, \frac{\hat{p}(E_i) + \hat{p}(E_j) - 1}{\hat{p}(E_j)} \right).$$

Після кожної зміни ймовірності виконується повторне калібрування матриці перехресного впливу та порівняння отриманих ймовірностей подій з початковими.

Оцінка впливу похибки середньозваженої оцінки апостеріорних ймовірностей подій

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\max \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}_{i,j,\text{Low}}(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right) + \max \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}_{i,j,\text{High}}(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right)}{2t_{i,j}N(N-1)},$$

де $t_{i,j} \in [1,10]$ — коефіцієнт довіри до експертної оцінки $\hat{p}(E_i / E_j)$ (за замовчанням дорівнює 1); $\hat{p}_{i,j,\text{Low}}(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при зниженні $\hat{p}(E_i / E_j)$; $\hat{p}_{i,j,\text{High}}(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при підвищенні $\hat{p}(E_i / E_j)$. Числові результати розрахунку наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Вплив похибки середньозваженої оцінки апостеріорних ймовірностей подій

Подія	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	
Підвищення, %	E_1	–	10,31	4,12	3,38	4,26	6,65	6,77	9,79	9,07	4,99
	E_2	3,36	–	4,60	5,66	7,11	5,42	6,42	5,32	7,29	9,25
	E_3	2,78	3,36	–	7,10	7,29	5,09	5,36	5,22	2,89	3,44
	E_4	6,49	3,01	5,52	–	3,04	3,75	6,47	6,33	5,84	4,06
	E_5	4,60	6,57	3,36	3,91	–	4,62	4,22	3,93	6,35	6,18
	E_6	5,45	6,15	6,74	4,49	5,55	–	3,71	4,02	6,18	4,78
	E_7	6,40	3,65	6,44	2,53	4,92	8,51	–	6,81	3,74	5,17
	E_8	7,08	3,65	6,53	6,40	6,10	5,73	3,60	–	4,74	4,67
	E_9	3,82	1,88	6,57	13,91	7,34	3,55	3,69	3,85	–	4,51
	E_{10}	5,70	4,87	5,36	5,48	6,06	4,88	4,27	5,13	4,67	–
Зниження, %	E_1	–	3,15	5,74	4,52	6,25	4,78	5,45	5,04	8,84	9,98
	E_2	2,58	–	5,25	3,44	7,02	4,42	4,73	5,42	3,35	3,78
	E_3	6,00	3,31	–	3,74	3,14	3,55	6,56	3,28	6,14	3,52
	E_4	4,03	4,11	2,99	–	5,21	5,64	6,07	2,95	7,14	5,69
	E_5	7,02	5,13	3,28	7,14	–	7,58	4,19	4,02	6,24	4,61
	E_6	5,58	6,15	6,74	4,35	5,55	–	3,63	6,09	3,14	4,88
	E_7	6,06	3,78	6,79	1,99	5,13	5,73	–	7,26	4,38	5,13
	E_8	4,33	2,94	5,53	5,61	11,19	3,93	4,43	–	4,47	4,62
	E_9	5,22	5,21	5,14	6,79	6,22	8,51	3,69	3,38	–	4,63
	E_{10}	4,57	4,87	5,36	5,57	6,70	5,16	5,04	4,96	5,17	–
max, %	13,91										
L_2 , %	5,25										

З метою зниження ймовірного впливу похибки середньозваженої оцінки апостеріорних ймовірностей подій необхідно провести додаткове обговорення та оцінювання щодо ймовірностей, зміна яких найбільше впливає на матрицю перехресного впливу. Уточнення експертної оцінки $\hat{p}(E_i / E_j)$ має супроводжуватись відповідним підвищенням коефіцієнта $t_{i,j}$.

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕВРАХУВАННЯ ЕКСПЕРТАМИ ПОДІЇ З НИЗЬКОЮ ЙМОВІРНІСТЮ

Для оцінки потенційного впливу події, яка має низьку ймовірність, проте у разі свого виникнення істотно впливає на систему, що досліджується, та матрицю перехресного впливу, необхідно провести імітаційне моделювання розширення матриці шляхом внесення до неї додаткових подій.

Ці додаткові події E_{N+1} мають відповідати таким вимогам:

$$\hat{p}(E_{N+1}) = 0,05,$$

$$\forall i: \hat{p}(E_{N+1} / E_i) = 0,05,$$

$$\forall i: \text{Odds}(\hat{p}(E_i)) / 3 \leq \text{Odds}(\hat{p}(E_i / E_{N+1})) \leq 3 \text{Odds}(\hat{p}(E_i)),$$

$$\forall i: \frac{\hat{p}(E_i) + \hat{p}(E_{N+1}) - 1}{\hat{p}(E_{N+1})} \leq \hat{p}(E_i / E_{N+1}) \leq \frac{\hat{p}(E_i)}{\hat{p}(E_{N+1})}.$$

Імітаційне моделювання здійснюється таким чином: до матриці перехресного впливу послідовно додається велика кількість подій з випадковими характеристиками, які задовольняють наведеним вище умовам. Після кожного такого додавання виконується повторне калібрування матриці перехресного впливу, а отримані дані ймовірності подій порівнюються з початковими.

Оцінка потенційного впливу неврахування експертами події, яка має низьку ймовірність, але істотно впливає на систему, розраховується за формулою

$$L_3 = \sum_{j=1}^K \frac{\max_i \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}^j(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right)}{K},$$

де K — загальна кількість подій, які були додані до матриці перехресного впливу; $\hat{p}^j(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при j -му додаванні події. Числові результати розрахунку наведено у табл. 5.

Значення L_3 характеризує очікувані зміни у результатах калібрування матриці перехресного впливу в разі додавання до множини подій, що аналізуються, події, яка має низьку ймовірність, але істотно впливає на систему і буде відкинута на етапі відбору множини подій.

Таблиця 5. Максимальна зміна ймовірностей подій при додаванні події, яка має низьку ймовірність, але істотно впливає на систему

Зміна, %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	6,00	6,09	3,59	4,03	3,89	3,40	5,22	5,48	5,80	5,68
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,07	2,99	5,22	4,78	5,75	6,25	3,94	4,23	4,23	5,48
									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
4,69	4,82	7,76	8,55	4,96	4,87	4,56	4,13	5,42	5,75	
max, %	8,55									
L_3 , %	4,83									

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕВРАХУВАННЯ ЕКСПЕРТАМИ ПОДІЇ З НИЗЬКИМ ВПЛИВОМ

Для оцінки потенційного впливу події, яка за попереднім висновком експертів має низький рівень впливу на систему, але високу ймовірність, аналіз виконується за аналогією з попереднім випадком.

Додаткові події E_{N+1} мають відповідати таким вимогам:

$$\hat{p}(E_{N+1}) \geq 0,5,$$

$$\forall i: \hat{p}(E_{N+1} / E_i) = \hat{p}(E_{N+1}),$$

$$\forall i: \text{Odds}(\hat{p}(E_i)) / 1,3 \leq \text{Odds}(\hat{p}(E_i / E_{N+1})) \leq 1,3 \text{Odds}(\hat{p}(E_i)),$$

$$\forall i: \frac{\hat{p}(E_i) + \hat{p}(E_{N+1}) - 1}{\hat{p}(E_{N+1})} \leq \hat{p}(E_i / E_{N+1}) \leq \frac{\hat{p}(E_i)}{\hat{p}(E_{N+1})}.$$

Оцінка ймовірного впливу неврахування експертами події з низьким впливом

$$L_4 = \sum_{j=1}^K \frac{\max_i \left(\left| 1 - \frac{\text{Odds}(\hat{p}^j(E_i))}{\text{Odds}(\hat{p}(E_i))} \right| \right)}{K},$$

де K — загальна кількість подій, що були додані до матриці перехресного впливу; $\hat{p}^j(E_i)$ — ймовірність події E_i , отриманої при j -му додаванні події. Числові результати розрахунку наведено у табл. 6.

Значення L_4 характеризує очікувані зміни у результатах калібрування матриці перехресного впливу в разі додавання до множини подій, що аналізуються, події з низьким впливом на систему і буде відкинута на етапі відбору множини подій.

Таблиця 6. Максимальна зміна ймовірностей подій при додаванні події, яка має низький рівень впливу на систему та високу ймовірність

Зміна, %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	5,75	4,45	4,03	3,83	3,37	5,47	5,71	6,30	6,25	2,69
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	3,30	4,80	5,33	5,33	4,95	5,00	7,67	7,83	3,04	3,81
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	5,80	5,80	4,96	5,09	3,63	2,84	5,38	7,16	3,30	3,56
max, %	7,83									
L_4 , %	4,96									

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Одним із найважливіших технічних факторів, що впливають на точність дослідження за допомогою методу аналізу перехресного впливу, є кількість ітерацій методу Монте-Карло, які були виконані при імітаційному моделюванні ймовірних сценаріїв ключових подій.

Похибка результатів використання методу Монте-Карло може бути розрахована за формулою [5]

$$\varepsilon = \frac{3\sigma}{\sqrt{C}},$$

де σ — середнє квадратичне відхилення значення, що оцінюється; ε — точність результатів оцінювання; C — кількість ітерацій методу Монте-Карло.

На жаль, значення σ є невідомим та залежить від конкретної математичної моделі, яка застосовується при моделюванні кожної ітерації методу Монте-Карло.

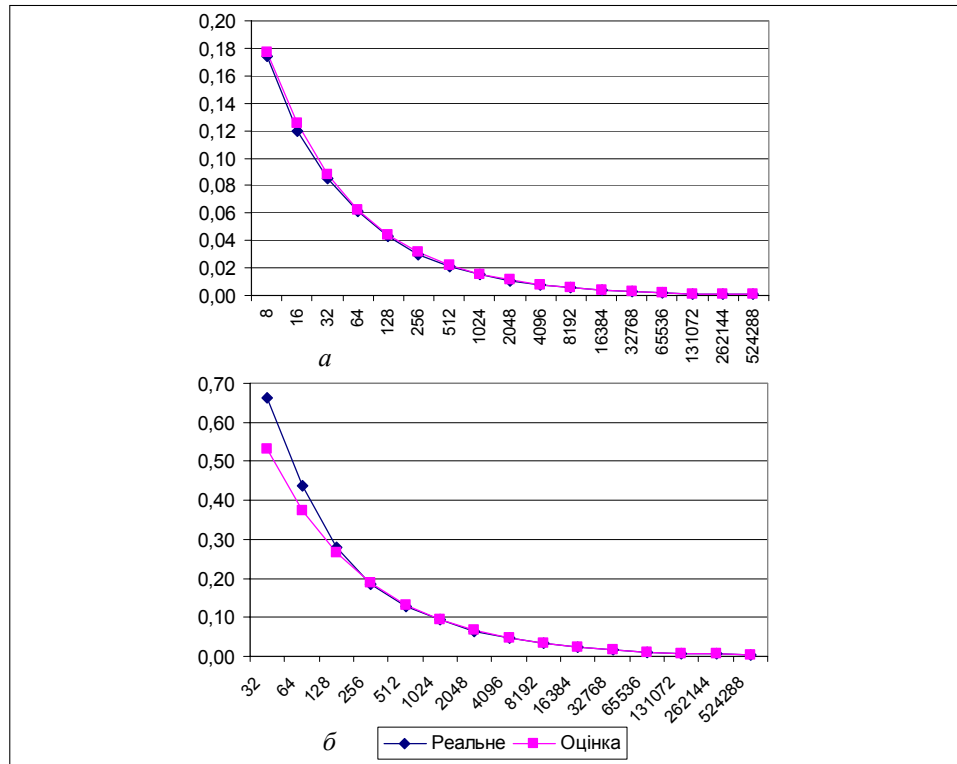
Експериментальним шляхом було виявлено, що для математичної моделі, яка використовується у методі перехресного впливу, при оцінці ймовірностей σ приблизно дорівнює 1/6, а при оцінці «шансів» — 1. Результати одного з експериментів наведено у табл. 7. та на рисунку.

Таблиця 7. Залежність середнього квадратичного відхилення оцінок ймовірностей та «шансів» від кількості ітерацій методу Монте-Карло

Кількість ітерацій	Середнє квадратичне відхилення ймовірностей	Оцінка похибки ймовірностей ($\sigma = 1/6$)	Середнє квадратичне відхилення «шансів»	Оцінка похибки «шансів» ($\sigma = 1$)
8	0,17391985	0,17677670	121,45260481	1,06066017
16	0,11950909	0,12500000	26,06037514	0,75000000
32	0,08524089	0,08838835	0,66268642	0,53033009
64	0,06122748	0,06250000	0,43798070	0,37500000
128	0,04315163	0,04419417	0,27845413	0,26516504
256	0,02971487	0,03125000	0,18672351	0,18750000
512	0,02063761	0,02209709	0,12955391	0,13258252
1024	0,01530485	0,01562500	0,09479271	0,09375000
2048	0,01053815	0,01104854	0,06404747	0,06629126
4096	0,00748601	0,00781250	0,04574006	0,04687500

Закінчення табл. 7

8192	0,00532816	0,00552427	0,03243451	0,03314563
16384	0,00377529	0,00390625	0,02297477	0,02343750
32768	0,00265085	0,00276214	0,01612456	0,01657282
65536	0,00188393	0,00195313	0,01139917	0,01171875
131072	0,00130126	0,00138107	0,00799430	0,00828641
262144	0,00096252	0,00097656	0,00585035	0,00585938
524288	0,00067360	0,00069053	0,00412503	0,00414320



Графік залежності середнього квадратичного відхилення оцінок ймовірностей (а) та «шансів» (б) від кількості ітерацій методу Монте-Карло

Оцінку ймовірного впливу недостатньої кількості ітерацій методу Монте-Карло можна обрахувати за формулою

$$L_5 = \varepsilon = \frac{3\sigma}{\sqrt{C}} = |\sigma = 1| = \frac{3}{\sqrt{C}}.$$

При калібруванні матриці перехресного впливу (див. табл. 2) було виконано 100000 ітерацій методу Монте-Карло, тому $L_5 = \frac{3}{\sqrt{100000}} \approx 0,95\%$.

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ДОСТОВІРНОСТІ

На базі проведених обчислень значень ($L_1 \dots L_5$) можна розрахувати інтегральний коефіцієнт достовірності результатів аналізу перехресного впливу за допомогою формули

$$D = \prod_{i=1}^5 (1 - L_i).$$

Для матриці перехресного впливу (див. табл. 2) коефіцієнт достовірності дорівнюватиме значенню

$$D = (1 - 0,0553)(1 - 0,0525)(1 - 0,0483)(1 - 0,0496)(1 - 0,0095) \approx 80,2\%.$$

ВИСНОВКИ

На методологічній основі системного аналізу досліджено дію якісних властивостей вхідних даних на результати використання методу аналізу перехресного впливу.

З'ясовано, що найбільшу дію на достовірність результатів аналізу перехресного впливу мають такі чинники:

- Наявність похибки у середньозважених апіорних ймовірностей подій.
- Наявність похибки у середньозважених апостеріорних ймовірностях подій.
- Вплив на систему, що досліджується, подій з низькою ймовірністю, які були відкинуті на попередньому етапі дослідження.
- Вплив на систему подій з низьким рівнем впливу, які були відкинуті на попередньому етапі дослідження.
- Наявність похибки у результатах калібрування матриці перехресного впливу методом Монте-Карло.

Для кожного з наведених чинників запропоновано алгоритм кількісної оцінки його потенційної дії на результати аналізу перехресного впливу. Крім того, на базі наведених розрахунків запропоновано метод обчислення коефіцієнта достовірності результатів використання методу перехресного впливу, що дозволяє швидко оцінити достовірність результатів дослідження в цілому та прийняти міри для її підвищення.

Наведені у статті алгоритми можуть бути успішно використані у міжнародних, національних та регіональних проектах технологічного передбачення і стратегічного планування, в яких використовується метод аналізу перехресного впливу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Згуровский М.З., Панкратова Н.Д.* Технологическое предвидение. — Киев: «Політехніка», 2005. — 154 с.
2. *Gordon Th.J.* Cross-impact method. — AC/UNU Millennium Project. — www.futurovenezuela.org/_curso/10-cross.pdf.
3. *Згуровський М.З.* Хто бачить майбутнє, той перемагає // Дзеркало тижня. — 2001. — № 25.
4. *Згуровский М.З., Панкратова Н.Д.* Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. — Киев: Наук. думка, 2005. — 744 с.
5. *Averill M. Law, W. David Kelton.* Simulation Modeling and Analysis. — NY, McGraw-Hill. — 1982. — 400 с.

Надійшла 08.04.2008