

І. С. Скітер, В. В. Деренговський, В. М. Рудько

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

## Порівняння майданчиків розміщення АЕС методом експертного оцінювання параметричних критеріїв

### Ключові слова:

майданчик розміщення,  
атомна електростанція,  
експертне оцінювання,  
відносна цінність альтернативи,  
аналіз безпеки,  
оцінка впливу,  
довкілля

Представлено спосіб порівняння майданчиків розміщення АЕС за допомогою методів експертного оцінювання параметричних критеріїв. Для узагальненого оцінювання майданчиків запропоновано такі фактори з відповідними критеріями: економічний (критерії «Мережі передачі енергії», «Експлуатаційні витрати», «Впливи на економіку»); соціальний (критерії «Транспортна мережа», «Юридичні аспекти», «Вплив туризму», «Права власності на землю», «Історичні місця», «Громадське визнання»); безпеки (критерії «Геологія та сейсмологія», «Густота населення», «Впливи на територію розміщення», «Вода для охолодження», «Метеорологія», «Гідрологія», «Топографія», «Землекористування», «Близькість до заболочених місць», «Шляхи евакуації», «Близькість до небезпечних об'єктів»). При цьому експертне оцінювання проводиться кожним експертом методом парного порівняння альтернатив. Критерії альтернатив розглядаються експертами комплексно і враховуються під час парного порівняння. Такий спосіб дає змогу в короткі терміни без значних фінансових витрат проводити оцінку й порівняння майданчиків розміщення нових ядерних установок. На прикладі проекту будівництва нових реакторів AP1000 показано процес порівняння майданчиків із трьох запропонованих. У результаті виконаного аналізу за критерієм максимального значення відносної цінності оптимальним майданчиком є альтернатива А1 — майданчик Хмельницької АЕС.

### Вступ

Виробництво енергії на АЕС вважається одним із таких, що зумовлює низький рівень викидів парникових газів на етапі генерації. Проте існує негативний вплив на екосистему на інших етапах ядерно-паливного циклу: наприклад, виготовлення палива (видобутку руди і збагачення урану), поводження з відходами. Однак у липні 2022 р. Європарламент відніс газ і атомну енергетику до «зеленої» таксономії — переліку екологічно чистих видів економічної діяльності, що відповідають концепції сталого розвитку. Крім того, розпорядженням

Кабінету Міністрів України № 373-р від 21 квітня 2023 р. схвалена «Енергетична стратегія України на період до 2050 року», в якій Україна розглядає атомну енергетику як одне з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії. На підтвердження такого вектору розвитку енергетики на сьогодні акціонерне товариство «Національна атомна енергогенеруюча компанія “Енергоатом”» (АТ «НАЕК “Енергоатом”») підписало угоду з компанією Westinghouse Electric Company на реалізацію проекту зі зведення двох енергоблоків за технологією AP1000 Westinghouse. Крім того, «Енергоатом» та американська компанія Holtec International підписа-

© І. С. Скітер, В. В. Деренговський, В. М. Рудько, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

ли генеральну угоду про передавання «Енергоатому» технології Holtec із виготовлення компонентів малих модульних реакторів. Для реалізації цих планів першочерговим постає питання вибору майданчика розміщення нових реакторів.

Мета представленої роботи — розробити прийнятний спосіб порівняння майданчиків розміщення АЕС за допомогою методів експертного оцінювання параметричних критеріїв.

### **Аналіз підходів до вибору майданчика розміщення АЕС**

Вимоги до вибору майданчика встановлюють законодавчі та нормативно-правові акти України. Порядок ухвалення рішень та вимоги до матеріалів, що обґрунтовують необхідність спорудження ядерних установок, визначено ст. 37 Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», Законом України «Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення». Зокрема в поданих матеріалах обов'язково мають бути:

характеристика навколишнього природного середовища в районі можливого розміщення установи;

звіт з оцінки впливу на довкілля запланованих робіт із будівництва ядерної установки, експлуатації та її зняття з експлуатації;

передбачені проектом заходи щодо запобігання негативному впливу на навколишнє природне середовище та зменшення цього впливу.

Рішення про розміщення, проектування, будівництво АЕС приймаються Верховною Радою України шляхом ухвалення відповідного закону. Верховна Рада України ухвалює рішення тільки в разі погодження місцевими органами виконавчої влади й органами місцевого самоврядування розміщення ядерної установки на своїй території. Проект закону до Верховної Ради України подає Кабінет Міністрів України.

У 2012 р. в Україні було розроблено та нині актуалізується «Кадастр майданчиків під будівництво енергоблоків нових АЕС», у якому обґрунтовано вибір семи районів для розміщення нових енергоблоків. Відповідно до законодавства України необхідно запропонувати на розгляд до Кабінету Міністрів України не менше трьох можливих варіантів розміщення

для початку робіт з обґрунтування вибору майданчика для будівництва нової АЕС. Процес його вибору включає в себе тривалу роботу зі схвалення територіальними громадами можливості подальших заходів із розгляду можливого місця розміщення нової АЕС. Під час розгляду майданчиків для розміщення нових енергоблоків на території діючих АЕС таке схвалення може пройти швидше, що значно прискорить процес його вибору.

У 2008 р. Державною інспекцією ядерного регулювання затверджено нормативний документ «Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції» НП 306.2.144-2008 [1], який встановлює вимоги з безпеки під час вибору майданчика для розміщення АЕС та враховує рекомендації Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). У цьому нормативі та публікації МАГАТЕ «Фундаментальні принципи безпеки» [2] йдеться про те, що «фундаментальна мета безпеки полягає в захисті людей і навколишнього середовища від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання». Принцип 8 SF-1 [2] щодо запобігання аваріям говорить, що «Всі практичні зусилля повинні бути спрямовані на мінімізацію наслідків ядерних або радіаційних аварій». У SF-1 [2] йдеться про те, що «Основним засобом запобігання та пом'якшення наслідків аварій є “глибокоєшелонований захист”» (п. 3.31). Глибокоєшелонований захист забезпечується відповідною комбінацією визначених систем і заходів, одним з яких є «адекватний вибір майданчика і включення належних проектних та інженерних рішень, що забезпечують запас міцності, різноманітність та резервування» (SF-1, п. 3.32). Для застосування цього принципу необхідно (НС-Р-3 [3] п. 2.1), щоб придатність майданчика для ядерної установки оцінювалася з урахуванням таких факторів:

вплив зовнішніх подій, що відбуваються в регіоні конкретного об'єкта (ці події можуть мати природне походження або бути зумовлені людиною);

характеристики майданчика та його оточення, які можуть впливати на розповсюдження радіоактивних речовин у навколишньому середовищі;

щільність і розподіл населення та інші характеристики зовнішньої зони в тій мірі, в якій вони можуть вплинути на можливість здійснення аварійних заходів та необхідність оцінки ризиків для окремих осіб і населення.

Вибір і оцінка майданчика, придатного для розміщення АЕС, можуть суттєво вплинути на вартість проекту, громадське сприйняття і безпеку АЕС про-

тягом усього терміну її експлуатації. Погане планування і виконання робіт з оцінки майданчика, брак інформації і незнання міжнародних та національних стандартів безпеки і визнаних передових практик можуть призвести до того, що невдало вибраний проєкт атомної електростанції може призвести до ухвалення помилкових рішень, які можуть спричинити серйозні затримки як на етапі будівництва, так і на етапі експлуатації АЕС.

У [4] процес вибору придатного майданчика для розміщення АЕС є багатогранним і включає оцінку організаційних та технічних рішень забезпечення безпеки. Цей вибір також передбачає відсіювання майданчиків, для яких додаткові заходи безпеки в проєкті, що були б необхідні для усунення таких небезпек, були б надмірно складними, або тих, де недостатньо знань для визначення цих заходів із достатнім ступенем впевненості.

Що стосується мінімізації наслідків аварій, то вибір майданчика має на меті зменшити можливий вплив аварії на людей і навколишнє середовище. Це передбачає вибір майданчика з такими характеристиками розповсюдження радіонуклідів у повітрі, поверхневих і підземних водах, а також із рельєфом місцевості, розподілом населення та інфраструкту-

рою, які б сприяли реалізації мінімального їхнього впливу в разі можливих потенційних аварій.

Процес вибору майданчика із самого початку повинен керуватися чітко встановленим набором критеріїв, узгоджених із відповідними регуляторними вимогами. Такі критерії мають особливе значення для тих факторів, за якими можливі майданчики можуть бути виключені з подальшого розгляду. Необхідно встановити баланс між характеристиками об'єкта та специфічними особливостями проєктування, заходами захисту об'єкта та адміністративними процедурами.

Існує два процеси, пов'язані із забезпеченням безпеки майданчика для розміщення АЕС, — вибір майданчика і його оцінювання. Ці два процеси далі поділяються на п'ять етапів:

- аналіз місць;
- вибір майданчика;
- визначення характеристик майданчика (перевірка та підтвердження його характеристик);
- передексплуатаційний етап;
- експлуатація.

Структура етапів обстеження ділянки та її оцінки розроблена у схематичному зображенні та наведена на рис. 1.

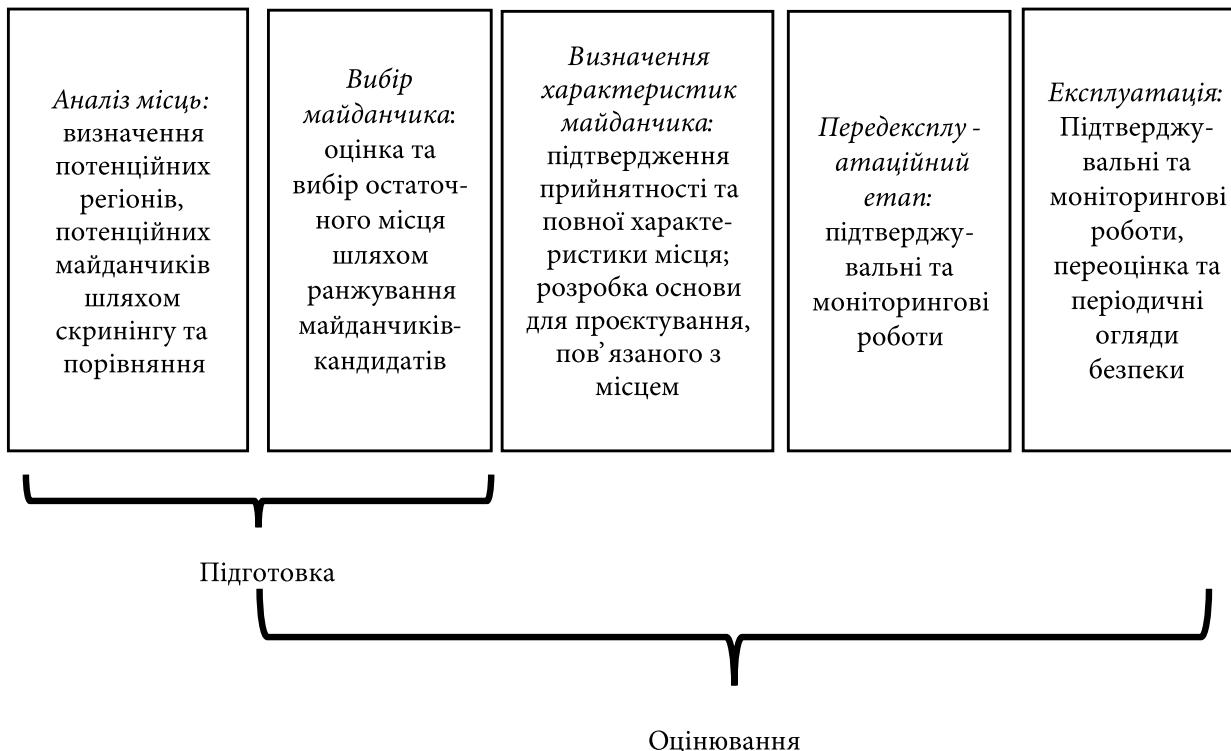


Рис. 1. Етапи процесів вибору та оцінки майданчика розміщення протягом терміну експлуатації АЕС [4]

На етапі аналізу місць досліджуються великі регіони з метою пошуку потенційних майданчиків і визначення однієї або декількох ділянок-кандидатів. Другим етапом процесу вибору майданчика є його відбір, на якому непридатні ділянки відкидають, а решту ділянок-кандидатів оцінюють шляхом перевірки та порівняння їх на основі організаційних і технічних рішень забезпечення безпеки та інших міркувань для вибору найкращих ділянок-кандидатів.

Згідно з [5] оцінка майданчика визначається як аналіз факторів, які можуть вплинути на безпеку установки або діяльності таким чином, що це може призвести до викиду радіоактивних речовин і/або вплинути на розповсюдження їх у навколишньому середовищі, а також питань, пов'язаних із безпекою та її впливом на населення (наприклад, можливість евакуації, розміщення людей і ресурсів).

Етап вибору майданчика включає в себе частину процесу його оцінювання і знаходиться на перетині між етапами вибору майданчика і оцінювання ділян-

ки (див. рис. 1 і 2). Після цього етапу підтверджується придатність ділянки і проводиться повна перевірка її характеристик разом із завершенням розробки основи для проектування у зв'язку з зовнішніми подіями, що відбулися під час етапу визначення характеристик майданчика. Цей процес у підсумку приводить до підготовки звіту з оцінювання безпеки майданчика як основи для розділу попереднього звіту з аналізу безпеки АЕС. Уся діяльність, пов'язана з майданчиком, включаючи підтверджувальні та моніторингові роботи, виконується на передексплуатаційному етапі.

Після затвердження остаточного звіту з аналізу безпеки АЕС починається оцінка майданчика на етапі експлуатації. Вона включає в себе всі підтверджувальні, моніторингові та переоцінювальні роботи, що проводяться протягом усього етапу експлуатації, і особливо під час періодичної переоцінки безпеки АЕС. Ця робота, як правило, відображається у звітах із періодичної переоцінки безпеки. Процес вибору майданчика та процес оцінки майданчика показані на рис. 2.

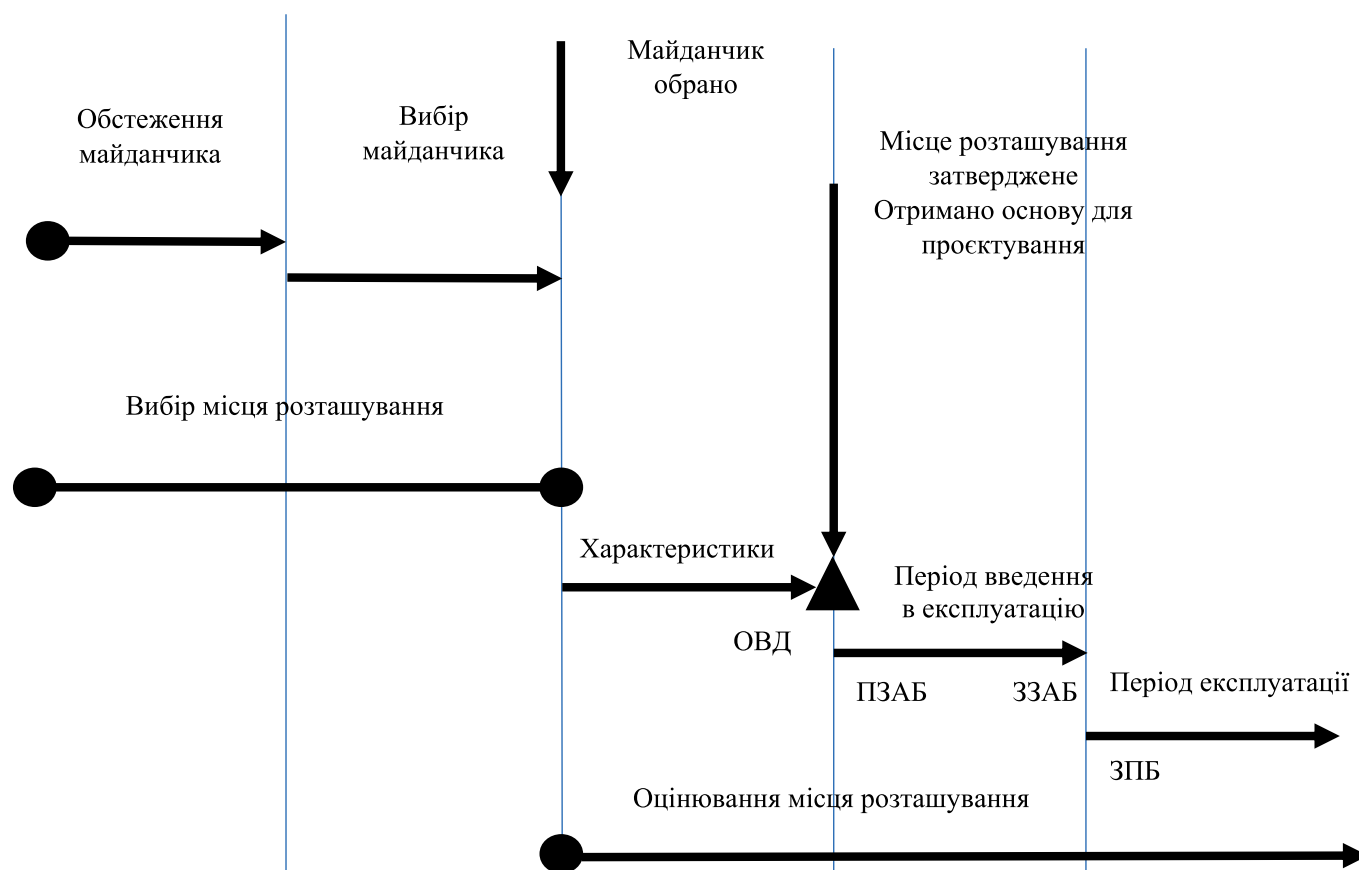


Рис. 2. Процес вибору оцінювання майданчика розміщення АЕС: ОВД — оцінка впливу на довкілля майданчика; ПЗАБ — попередній звіт з аналізу безпеки; ЗЗАБ — заключний звіт з аналізу безпеки; ЗПБ — звіт із переоцінки безпеки [4]

### Формалізація методики експертного оцінювання майданчиків

Методика оцінювання альтернативних майданчиків (альтернатив) базується на таких твердженнях (умовах) [6]:

1. Група з  $m$  експертів проводить комплексне оцінювання  $p$  альтернатив на основі їхньої внутрішньої структури — загального аналізу критеріїв.

2. Результатом оцінювання є встановлення параметрів переваги альтернатив під час порівняння кожної їхньої пари.

3. Оцінка попарного порівняння проводиться на основі встановлення причини, яка, на думку експерта, більше впливає на результат — визначення мотивованого вибору майданчика на основі законів, норм і вимог з безпеки до вибору майданчика для розміщення АЕС в Україні.

На основі результатів попарних порівнянь альтернатив групою експертів розраховуються комплексні оцінки для всієї сукупності альтернатив.

Число експертів у групі можна визначити на основі теорії вибіркового спостереження [7]

$$m = \frac{UW(1-UW)}{\Delta_p^2} t^2, \quad (1)$$

де  $m$  — необхідна кількість членів групи експертів;  $UW$  — питома вага експертів, які мають певні ознаки, що встановлені організаторами експертизи (на-

приклад, стаж роботи в цій сфері не менше 10 років тощо);  $t$  — критерій Стюдента при заданому рівні ймовірності;  $\Delta_p^2$  — середня гранична помилка.

Процес експертного попарного порівняння альтернатив проводиться поетапно і представлений на рис. 3.

*Етап 1. Оцінка впливу на процес порівняння всіх пар альтернатив*

Кожен із  $m$  експертів робить оцінку впливу на результат усіх пар альтернатив, встановлюючи числову оцінку:

$$a_{ij}^e = \begin{cases} 1, & \text{якщо альтернатива } A_i \text{ більш значуща, ніж } A_j \\ 0,5, & \text{якщо альтернативи } A_i \text{ та } A_j \text{ рівнозначні } A_j, \\ 0, & \text{якщо альтернатива } A_i \text{ менш значуща, ніж } A_j \end{cases} \quad (2)$$

де  $e = 1, 2, \dots, m$  — номер експерта;  $i, j = 1, 2, \dots, p$  — номери альтернатив, для яких проводиться експертне попарне порівняння (оцінювання).

За результатами експертного попарного оцінювання альтернатив отримуємо  $m$  матриць:

Експерт  $m$

|       | $A_1$    | ... | $A_i$    | ... | $A_p$    |
|-------|----------|-----|----------|-----|----------|
| $A_1$ | 0,5      | ... | $a_{1i}$ | ... | $a_{1p}$ |
| ...   | ...      | 0,5 | ...      | ... | ...      |
| $A_i$ | $a_{i1}$ | ... | 0,5      | ... | $a_{ip}$ |
| ...   | ...      | ... | ...      | 0,5 | ...      |
| $A_p$ | $a_{p1}$ | ... | $a_{pi}$ | ... | 0,5      |

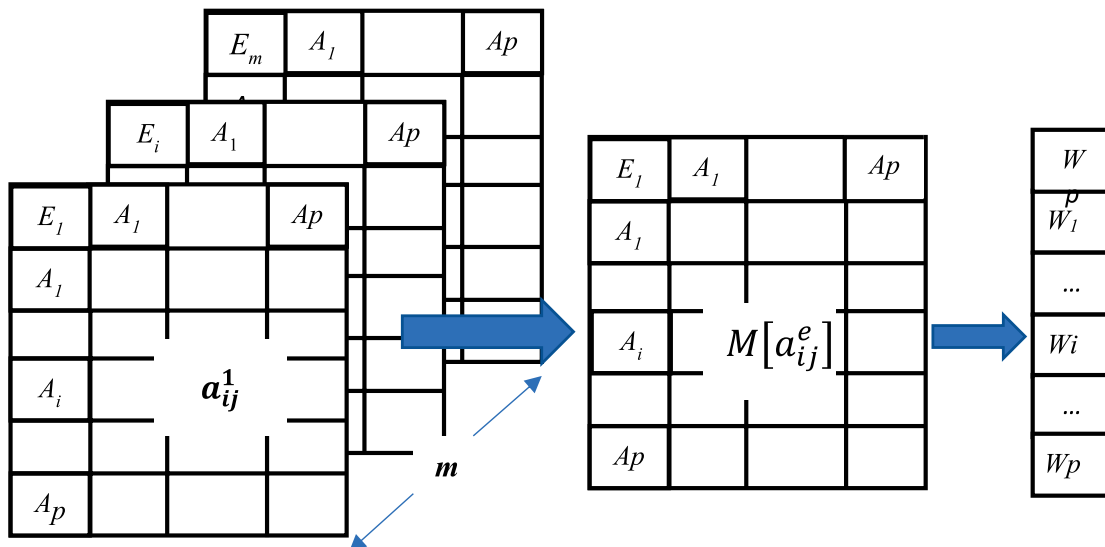


Рис. 3. Послідовність обробки результатів попарного експертного оцінювання альтернатив при порівнянні майданчиків розміщення АЕС

**Етап 2. Побудова матриці математичних очікувань оцінок усіх пар альтернатив**

Якщо під час оцінки пари альтернатив  $A_i$  та  $A_j$  на всій множині  $i, j = 1, p$  із загальної кількості експертів  $m$  за перевагу альтернативи  $A_i$  висловилося  $m_i$  експертів, за перевагу альтернативи  $A_j$  висловилося  $m_j$  експертів, а  $m_k$  вважає, що альтернативи  $A_i$  та  $A_j$  рівнозначні, то оцінка математичного очікування дискретної випадкової величини  $M[a_{ij}^e]$  визначається як

$$M[a_{ij}^e] = \bar{x}_{ij} = 1 \cdot \frac{m_i}{m} + 0,5 \cdot \frac{m_k}{m} + 0 \cdot \frac{m_j}{m}, \quad e = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Оскільки загальна кількість експертів  $m = m_i + m_k + m_j$ , то  $m_k = m - m_i - m_j$ . Підставляючи значення  $m_k$  у формулу (3), отримаємо

$$\bar{x}_{ij} = 1 \cdot \frac{m_i}{m} + 0,5 \cdot \left( \frac{m - m_i - m_j}{m} \right) = \frac{1}{2} + \frac{m_i - m_j}{2m}. \quad (4)$$

У результаті отримуємо сукупність величин  $\bar{x}_{ij}$ , яка утворює узагальнену матрицю математичних очікувань  $\bar{X} = (\bar{x}_{ij})$  розмірності  $p \times p$  величини  $a_{ij}$ :

|       |                |     |                |     |                |
|-------|----------------|-----|----------------|-----|----------------|
|       | $A_1$          | ... | $A_i$          | ... | $A_p$          |
| $A_1$ | 0,5            | ... | $\bar{x}_{1i}$ | ... | $\bar{x}_{1p}$ |
| ...   | ...            | 0,5 | ...            | ... | ...            |
| $A_i$ | $\bar{x}_{i1}$ | ... | 0,5            | ... | $\bar{x}_{ip}$ |
| ...   | ...            | ... | ...            | 0,5 | ...            |
| $A_p$ | $\bar{x}_{p1}$ | ... | $\bar{x}_{pi}$ | ... | 0,5            |

**Етап 3. Визначення відносних цінностей альтернатив**

На основі матриці математичних очікувань  $\bar{X} = (\bar{x}_{ij})$  за допомогою ітераційного алгоритму визначається вектор відносних цінностей альтернатив

$$W = (W_1, \dots, W_i, \dots, W_p)^{(s)},$$

де  $S = (s_i)$ ,  $i = \overline{1, p}$  — крок ітерації.

Ітераційний алгоритм виконується за наведених нижче умов.

1. Початкова умова  $s = 0$ :

$$W^{(0)} = (1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1).$$

2. Рекурентні співвідношення

$$W^{(s)} = \frac{1}{\lambda^{(s)}} \cdot \bar{X} \cdot W^{(s-1)}, \quad (5)$$

$$\lambda^{(s)} = (1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1) \cdot \bar{X} \cdot W^{(s-1)}, \quad (6)$$

де  $\lambda^{(s)}$ ,  $s = (\overline{1, p})$  — нормувальний коефіцієнт;  $\bar{X}$  — матриця математичних очікувань оцінок пар альтернатив;  $W^{(s)}$ ,  $W^{(s-1)}$  — вектори відносних цінностей альтернатив  $s$ -го та  $(s-1)$ -го порядків відповідно.

3. Умова нормування

$$\sum_{i=1}^p W_i^{(s)} = 1. \quad (7)$$

4. Ознака закінчення алгоритму

$$\max \left( \text{abs} \left( W^{(s)} - W^{(s-1)} \right) \right) < \alpha, \quad (8)$$

де  $\alpha$  — заданий рівень значущості (точності).

У результаті отримуємо визначення на певному рівні ітерації  $s$  вектор відносних цінностей альтернатив із заданим рівнем значущості.

$$W^{(s)} = (W_1^{(s)} \ \dots \ W_i^{(s)} \ \dots \ W_p^{(s)}).$$

**Етап 4. Ранжування альтернатив за величиною їх відносної цінності**

Ранжування альтернатив проводиться за величиною їхньої відносної цінності:  $W^* > \dots > W^0$ , де  $W_i^* = \text{argmax}(W_i)$ ,  $W_i^0 = \text{argmin}(W_i)$ .

Результати ранжування передаються особі, яка ухвалює рішення.

**Реалізація методу порівняння майданчиків розміщення АЕС**

Розглянемо процес експертного оцінювання та порівняння майданчиків розміщення нових ядерних установок, масив яких представлений набором трьох альтернатив — майданчиків діючих АЕС відповідно до [1]:

Хмельницька АЕС —  $A_1$ ;

Рівненська АЕС —  $A_2$ ;

Південноукраїнська АЕС —  $A_3$ .

Слід зазначити, що на первинному етапі аналізу експертні методи застосовуються для узагальненого аналізу альтернатив, без детального розгляду та порівняння всіх критеріїв за відповідними групами факторів — технічними, технологічними, соціально-економічними тощо. При цьому експерт-

Таблиця 1. Результати попарного експертного оцінювання

| Експерт 1 |       |       |       | Експерт 2  |       |       |       | Експерт 3  |       |       |       | Експерт 4  |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
|           | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
| $A_1$     | 0,5   | 1     | 1     | $A_1$      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | $A_1$      | 0,5   | 1     | 0,5   | $A_1$      | 0,5   | 0,5   | 1     |
| $A_2$     | 0     | 0,5   | 0     | $A_2$      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | $A_2$      | 0     | 0,5   | 0     | $A_2$      | 0,5   | 0,5   | 1     |
| $A_3$     | 0     | 1     | 0,5   | $A_3$      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | $A_3$      | 0,5   | 1     | 0,5   | $A_3$      | 0     | 0     | 0,5   |
| Експерт 5 |       |       |       | Експерт 6  |       |       |       | Експерт 7  |       |       |       | Експерт 8  |       |       |       |
|           | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
| $A_1$     | 0,5   | 0     | 0     | $A_1$      | 0,5   | 1     | 0     | $A_1$      | 0,5   | 0     | 1     | $A_1$      | 0,5   | 0     | 0     |
| $A_2$     | 1     | 0,5   | 1     | $A_2$      | 0     | 0,5   | 0,5   | $A_2$      | 1     | 0,5   | 0     | $A_2$      | 1     | 0,5   | 0     |
| $A_3$     | 1     | 0     | 0,5   | $A_3$      | 1     | 0,5   | 0,5   | $A_3$      | 0     | 1     | 0,5   | $A_3$      | 1     | 1     | 0,5   |
| Експерт 9 |       |       |       | Експерт 10 |       |       |       | Експерт 11 |       |       |       | Експерт 12 |       |       |       |
|           | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |            | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
| $A_1$     | 0,5   | 1     | 0,5   | $A_1$      | 0,5   | 0,5   | 0     | $A_1$      | 0,5   | 0,5   | 1     | $A_1$      | 0,5   | 1     | 1     |
| $A_2$     | 0     | 0,5   | 1     | $A_2$      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | $A_2$      | 0,5   | 0,5   | 0     | $A_2$      | 0     | 0,5   | 1     |
| $A_3$     | 0,5   | 0     | 0,5   | $A_3$      | 1     | 0,5   | 0,5   | $A_3$      | 0     | 1     | 0,5   | $A_3$      | 0     | 0     | 0,5   |

не оцінювання проводиться кожним експертом методом попарного порівняння (у балах порівняння згідно з формулою (1)), критерії альтернатив розглядаються експертами комплексно і враховуються під час попарного порівняння. Враховуючи вимоги [1] для узагальненого оцінювання майданчиків, запропоновано такі фактори з відповідними критеріями [7]:

1) *економічний фактор*: критерії — «Мережі передачі енергії», «Експлуатаційні витрати», «Впливи на економіку»;

2) *соціальний фактор*: критерії — «Транспортна мережа», «Юридичні аспекти», «Вплив туризму», «Права власності на землю», «Історичні місця», «Громадське визнання»;

3) *фактор безпеки*: критерії — «Геологія та сейсмологія», «Густота населення», «Впливи на територію розміщення», «Вода для охолодження», «Метеорологія», «Гідрологія», «Топографія», «Землекористування», «Близькість до заболочених місць», «Шляхи евакуації», «Близькість до небезпечних об'єктів».

У загальному списку експертів Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, складеному з 30 спеціалістів, 28 мають стаж роботи в галузі ядер-

ної, радіаційної безпеки та екології понад 15 років. З огляду на задану межу стажу роботи, середньої граничної помилки  $\Delta_p = 0,15$ , значення показника  $t = 2$  для ймовірності  $p = 0,9545$  — питома вага експертів становить

$$UW = \frac{28}{30} = 0,93.$$

Тоді необхідна кількість експертів становить

$$m = \frac{0,93(1 - 0,93)}{0,15^2} 2^2 = 11,06 = 12.$$

Результати експертних попарних порівнянь альтернатив (*етап 1*) представлені в табл. 1.

*Етап 2. Побудова матриці математичних очікувань оцінок усіх пар альтернатив*

Результати попарних порівнянь згідно з позначеннями у формулі (4):

для пари альтернатив  $A_1$  та  $A_2$  —  $m_i = 5$ ,  $m_j = 3$ ;

для пари альтернатив  $A_1$  та  $A_3$  —  $m_i = 5$ ,  $m_j = 4$ ;

для пари альтернатив  $A_2$  та  $A_3$  —  $m_i = 4$ ,  $m_j = 5$ .

Розрахунок значень елементів матриці математичних очікувань за формулою (4):

$$x_{11} = \frac{1}{2} + \frac{0-0}{2 \times 12} = 0,5; \quad x_{12} = \frac{1}{2} + \frac{5-3}{2 \times 12} = 0,58; \quad x_{13} = \frac{1}{2} + \frac{5-4}{2 \times 12} = 0,54;$$

$$x_{21} = 1 - x_{12} = 0,42; \quad x_{22} = 0,5; \quad x_{23} = \frac{1}{2} + \frac{4-5}{2 \times 12} = 0,46;$$

$$x_{31} = 1 - x_{13} = 0,46; \quad x_{32} = 1 - x_{23} = 0,54; \quad x_{33} = 0,5.$$

Матриця математичних очiкувань:

|       | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 0,50  | 0,58  | 0,54  |
| $A_2$ | 0,42  | 0,50  | 0,46  |
| $A_3$ | 0,46  | 0,54  | 0,50  |

Етап 3. Визначення відносних цiнностей альтернатив (iз заданою точнiстю  $\alpha = 0,05$ , чи ймовiрнiстю  $p = 0,95$ )

Крок iтерацiї 0:

$$W^{(0)} = (1 \ 1 \ 1)^{s=0}.$$

Крок iтерацiї 1:

$$S^{(1)} = X \times W^{(0)} = \begin{pmatrix} 0,50 & 0,58 & 0,54 \\ 0,42 & 0,50 & 0,46 \\ 0,46 & 0,54 & 0,50 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^{(1)} = (1 \ 1 \ 1) \times S^{(1)} = (1 \ 1 \ 1) \times \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix} = 4,5,$$

$$W^{(1)} = \frac{1}{\lambda^{(1)}} \times S^{(1)} = \frac{1}{4,5} \times \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,36111111 \\ 0,30555556 \\ 0,33333333 \end{pmatrix}.$$

Крок iтерацiї 2:

$$S^{(2)} = X \times W^{(1)} = \begin{pmatrix} 0,50 & 0,58 & 0,54 \\ 0,42 & 0,50 & 0,46 \\ 0,46 & 0,54 & 0,50 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,361 \\ 0,306 \\ 0,333 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^{(2)} = (1 \ 1 \ 1) \times S^{(2)} = (1 \ 1 \ 1) \times \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix} = 1,493,$$

$$W^{(2)} = \frac{1}{\lambda^{(2)}} \times S^{(2)} = \frac{1}{1,493} \times \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,36124031 \\ 0,30542636 \\ 0,33333333 \end{pmatrix}.$$

Оцiнка точностi визначення відносних цiнностей альтернатив:

$$\max(|0,36124031 - 0,36111111|, |0,30542636 - 0,30555556|, |0,33333333 - 0,33333333|) = 0,000129199 < 0,05 \text{ — умова (7) ви-}$$

конана — кiнець роботи алгоритму.

Вектор відносних цiнностей альтернатив:

$$W = (W_1 = 0,3612 \quad W_2 = 0,3054 \quad W_3 = 0,3333).$$

Ранжування альтернатив проводиться за величиною їхньої відносної цiнностi:

$$\text{Ranking } W = (W_1 = 0,3612 > W_3 = 0,3333 > W_2 = 0,3054).$$

Найкраща за цiннiстю альтернатива:

$$W_i^* = \operatorname{argmax}(W_i) = W_1 - A_1 \text{ «Хмельницька АЕС»}.$$

Найгiрша за цiннiстю альтернатива:

$$W_i^0 = \operatorname{argmin}(W_i) = W_2 - A_2 \text{ «Рiвненська АЕС»}.$$

## Висновки

У роботi представлено пiдхiд до порiвняння майданикiв розмiщення АЕС за допомогою методiв експертного оцiнювання параметричних критерiїв. На первинному етапi порiвняння запропонований метод використовується для узагальненого аналізу альтернатив, без детального розгляду та порiвняння всiх критерiїв за вiдповiдними групами факторiв — технiчними, технологiчними, соцiально-економiчними тощо. При цьому експертне оцiнювання проводиться кожним експертом методом попарного порiвняння альтернатив, критерiї альтернатив розглядаються експертами комплексно i враховуються пiд час попарного порiвняння. Цей спiсiб дозволяє в короткi термiни без значних фiнансових витрат провести попереднiй узагальнений порiвняльний експертний аналіз та сформулювати рекомендацiї для оцiнювання майданикiв розмiщення нових реакторiв, який ґрунтується на числових характеристиках. На прикладі проекту будiвництва нових реакторiв AP1000 показано процес порiвняння на основi числових оцiнок майданикiв iз трьох запропонованих. У результатi виконаного аналізу оптимальною є альтернатива A1 — майданик Хмельницької АЕС.

## Список використаної літератури

1. НП 306.2.144-2008. Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції. Затверджено наказом Держатомрегулювання України № 68 від 07.04.2008 р., зареєстровано в М-ві юстиції України 28.05.2008 р. за № 467/15158.
2. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1 / European Atomic Energy Community, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, International Maritime Organization, et al. — Vienna: IAEA, 2006. — 37 p.
3. Site evaluation for nuclear installations, IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3 / International Atomic Energy Agency. — Vienna: IAEA, 2003. — 49 p.
4. Site survey and site selection for nuclear installations. IAEA Safety Standards Series No. SSG-35. — Vienna: IAEA, 2015. — 84 p.
5. IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition / International Atomic Energy Agency. — Vienna: IAEA, 2007. — 238 p.
6. Деренговський В. В. Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію / В. В. Деренговський, І. С. Скітер // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 1 (23). — С. 45–55. — doi.org/10.31717/2311-8253.22.1.5.
7. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрями використання / Б. Є. Грабовецький. — Вінниця: ВНТУ. — 2010. — 171 с.

of tourism”, “Land ownership rights”, “Historical sites”, “Public recognition”: safety factor: criteria — “Geology and seismology”, “Population density”, “Impacts on the location area”, “Cooling water”, “Meteorology”, “Hydrology”, “Topography”, “Land use”, “Proximity to wetlands”, “Evacuation routes”, “Proximity to hazardous facilities”. In this case, the expert assessment is carried out by each expert using the method of pairwise comparison of preferences, the criteria of alternatives are considered by experts comprehensively and taken into account in the pairwise comparison. This method allows for the assessment and comparison of new nuclear objects siting sites in a short time without significant financial costs. The example of the AP1000 new reactor construction project shows the process of comparing sites out of three proposed ones. The article presents an approach to comparing NPP siting sites using methods of expert evaluation of parametric criteria. At the initial stage of comparison, the proposed method is used for a generalised analysis of alternatives, without a detailed consideration and comparison of all criteria by relevant groups of factors — technical, technological, socio-economic, etc. At the same time, each expert makes an expert assessment by the method of pairwise comparison of preferences, the criteria of alternatives are considered by experts comprehensively and taken into account in the pairwise comparison. This method allows conducting a preliminary generalised comparative expert analysis and formulating recommendations for the assessment of new reactor siting sites in a short time without significant financial costs, based on numerical characteristics. Using the example of the AP1000 new reactor construction project, the paper demonstrates the comparison process based on numerical assessments of three proposed sites. The analysis shows that alternative A1, the Khmelnytskyi NPP site, is the best option.

**I. S. Skiter, V. V. Derenhovskyi, V. M. Rudko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,  
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

## Comparison of NPP Siting Sites by Expert Evaluation of Parametric Criteria

The article presents a method for comparing NPP siting sites using methods of expert evaluation of parametric criteria. For a generalised assessment of sites, the following factors with corresponding criteria are proposed: economic factor: criteria — “Energy transmission networks”, “Operating costs”, “Impacts on the economy»; social factor: criteria — “Transport network”, “Legal aspects”, “Impact

**Keywords:** siting site, nuclear power plant, expert assessment, relative value of an alternative, safety analysis, impact assessment, environment.

## References

1. NP 306.2.144-2008. *Safety Requirements for the Selection of a Nuclear Power Plant Site*. Approved by SNRIU Order no. 68, dated 07.04.2008. Kyiv: SNRIU, 2008. (in Ukr.)
2. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1. Vienna: IAEA, 37 p.
3. *Site evaluation for nuclear installations*. IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3. Vienna: IAEA, 2003, 49 p.
4. *Site survey and site selection for nuclear installations*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-35. Vienna: IAEA, 2015, 84 p.

5. IAEA *Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*, 2007 Edition. Vienna: IAEA, 2007, 238 p.
6. Derenhovskiy V. V., Skiter I. S. (2022). [Three-level model assessment of potential scenarios of the Shelter object transformation into an ecologically safe system based on global factor]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. doi.org/10.31717/2311–8253.22.1.5. (in Ukr.)
7. Hrabovetskyi B. E. (2010). [Methods of expert assessments: theory, methodology, directions of use]. Vinnytsia: VNTU, 171 p. (in Ukr.)

Надійшла 17.06.2024

Received 17.06.2024