

А. Носовський, І. Скітер\*, В. Деренговський, В. Рудько

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*\*Відповідальний автор: [i.skiter@ispnpp.kiev.ua](mailto:i.skiter@ispnpp.kiev.ua)УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ  
ТИПУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Запропоновано модель комплексного оцінювання та вдосконалений метод порівняльного аналізу типів ядерних реакторів для України, що ґрунтуються на методичних підходах, розроблених у межах проєктів “Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems” (KIND) і “Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options” (CENESO). Формування ключових та допоміжних наборів індикаторів для аналізу проведено згідно з рекомендаціями нормативних документів МАГАТЕ та з урахуванням національних особливостей енергетичної системи України. Формалізовано етапи системного підходу до порівняльного аналізу та розроблено алгоритм оцінки на основі показників та їх індикаторів. Удосконалення методу спрямоване на одночасне врахування кількісних і якісних показників та їх індикаторів, використання адекватних методів визначення вагових коефіцієнтів і розроблення підходів до їх комплексного оцінювання. Розроблені модифікації методів аналізу дають змогу визначати відносні цінності типів ядерних реакторів з урахуванням експертних оцінок та вимог осіб, що приймають рішення. Для комплексної оцінки типів ядерних реакторів було запропоновано зважену «узагальнену інтегральну функцію цінності». Розроблений удосконалений метод базується на системному підході, формуванні масиву кількісних і якісних показників та їх індикаторів для відповідних груп цілей, методі аналізу ієрархій та методі багатокритеріальної оптимізації. Деталізація параметрів типів ядерних реакторів дає змогу врахувати вимоги осіб, які приймають рішення, щодо технічних, економічних, безпекових та інших показників та їх індикаторів.

*Ключові слова:* типи ядерних реакторів, метод INPRO, ключові індикатори, порівняльний аналіз, системний підхід, експертна оцінка, вагові коефіцієнти, узагальнена функція цінності, комплексне оцінювання альтернатив, оптимальний вибір, прийняття рішень.

## 1. Вступ

У забезпеченні енергетичної незалежності України ядерна енергетика відіграє надзвичайно важливу роль. Так з 2015 р. частка АЕС у загальному виробництві електроенергії в Україні становить більше 50 %. Однак, станом на 2022 р. 12 з 15 енергоблоків АЕС України потребують оновлення чи заміни [1].

В Енергетичній стратегії України на період до 2050 р. [2] серед основних заходів для реалізації стратегічних цілей у сфері генерування електроенергії особливо виділяється необхідність вибору реакторних технологій (РТ) для будівництва нових ядерних енергоблоків на заміщення потужностей АЕС, що будуть виводитися з експлуатації після 2030 р. Тому для успішної реалізації цих тез необхідне проведення наукових досліджень, спрямованих на обґрунтування вибору сучасної РТ, розробки наукових методів оптимального вибору перспективних типів ядерних реакторів (ЯР) для України. Згідно з [3, с. 1–2] використання методу вибору оптимального типу ЯР чи ядерних технологій (ЯТ) повинно проводитися з урахуванням того, що «конкретний спектр варіантів, що підлягають включенню, і конкретні критерії, які повинні використовуватися в оцінці,

були залишені в якості завдання для держав-членів або групи експертів, які проводять порівняльну оцінку». Тому визначення оптимального типу ЯР має виконуватися за техніко-економічними, безпековими, соціальними та іншими показниками з урахуванням національних особливостей функціонування та розвитку енергетичної системи України, а рекомендований метод оцінювання варіантів потребує модифікації та доопрацювання саме з цих причин.

Оцінка РТ та їхній оптимальний вибір базуються на послідовному аналізі загальних підходів до оцінювання та порівняльного аналізу, формуванні відповідних масивів даних для аналізу та виборі методів оцінювання альтернатив.

## 2. Аналіз підходів до оцінювання та порівняльного аналізу

Базою для порівняльного аналізу та оптимального вибору типів ЯР в Україні є методи МАГАТЕ, розроблені в період 2014–2017 рр. у рамках розвитку Міжнародного проєкту з інноваційних ЯР та паливних циклів (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, INPRO) [4], а саме проєкт «Ключові індикатори для інноваційних ядерно-енергетичних систем»

© Автор(и), 2026

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

(Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems, KIND) [5], який сформулював рекомендації щодо наборів ключових індикаторів (KI), у той час як конкретний спектр варіантів, що підлягають включенню, і конкретні критерії, які повинні використовуватися в оцінці, були залишені в якості завдання для держав-членів або групи експертів, які проводять порівняльну оцінку [3, с. 1–2].

Параметри, технології та характеристики типів ЯР, наведені в інформаційній базі даних ARIS (Advanced Reactor Information System) [6–8], є якісно недостатніми для прийняття рішень, оскільки не охоплюють інші сторони ядерних енергетичних систем (ЯЕС) – економічні, безпекові, екологічні, соціальні тощо.

У проекті МАГАТЕ INPRO “Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options” (CENESO) [9] детально викладено методичні засади та практичні рекомендації щодо порівняльного аналізу й оцінювання ЯЕС, а також розглянуто розширений підхід до порівняльної оцінки типів ЯЕС, ЯТ та ЯР. Але при цьому не враховуються національні нормативні вимоги до безпечної експлуатації АЕС та національної концепції розвитку ядерної енергетики [10] в Єдиній енергетичній системі України.

У методі на базі проекту KIND рекомендовано визначати 15–20 KI, вагові коефіцієнти яких визначаються експертами у відповідній галузі ядерної інженерії [11] з урахуванням міжнародних стандартів безпеки WENRA [12], EUR [13], МАГАТЕ [14] та нормативних вимог України [15]. У роботі [16] 42 індикатори для первинної оцінки формуються за моделлю «3Е – енергетика, економіка, екологія» за чотирма напрямками: макроекономіка та соціально-економічні питання, енергетика та електроенергетика, атомна енергетика та навколишнє середовище. У рамках проекту KIND для проведення порівняльної оцінки ЯЕС рекомендується використовувати 15 KI та 15 вторинних (додаткових) індикаторів [16]. Кожен з них може оцінюватися за бальною шкалою або в натуральних одиницях.

Відповідно до особливостей енергетичного ринку України в роботі [17] на основі [18] та [19] сформовано загальний перелік, що відповідає особливостям енергетичної системи України і включає в себе вісім підгруп показників та їх 26 індикаторів для порівняльного аналізу за трьома групами цілей.

Реалізація задачі порівняльного аналізу ЯЕС (типів РТ чи ЯР) та їх оптимального вибору включає в себе використання відповідного математичного апарату для його реалізації. У [5] та [19] рекомендується використання методу багатокритеріального аналізу (БКА) рішень [20]. У [5] та [19] в якості основного методу порівняльної оцінки ЯЕС було обрано метод багатоатрибутивної

теорії цінності MAVT (Multi-Attribute Value Theory). У [21] узагальнено досвід застосування цього методу порівняльної оцінки альтернатив. Однак у розглянутих роботах оцінювання вагових коефіцієнтів здійснюється експертними методами. Так у роботі [17] цілі високого рівня, області оцінювання та критерії згідно з національними пріоритетами енергетики України оцінено виключно експертними методами, БКА виконано на основі бального оцінювання кількісних та якісних показників РТ згідно з рекомендаціями KIND. Такий підхід є дещо суперечливим, оскільки не враховує кількісну та якісну характеристики запропонованих критеріїв; вибір типів РТ чи ЯР із застосуванням виключно методології MAVT-БКА, вносить значну міру невизначеності та суб’єктивності у формування результуючої функції цінності альтернатив і в процес прийняття рішення особою, яка приймає рішення (ОПР).

У роботі [22] запропоновано спеціальну функцію цінності за умови, коли в масивах критеріїв присутні критерії, які підлягають мінімізації та максимізації одночасно, вибрано метод безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали та вказано похибку їхнього визначення. У роботі [23] запропоновано модифікований метод БКА для оцінювання цінності альтернатив на основі узагальненої зваженої адитивної функції цінності, що включає вагові коефіцієнти як індикаторів, так і показників.

На основі проведеного аналізу методів виділено проблеми, що потребують досліджень за такими напрямками: розширення методів аналізу; вдосконалення використання експертних методів; розробка пропозицій щодо визначення вагових коефіцієнтів на різних рівнях ієрархії; модифікація методів формування узагальненої цінності альтернатив. Відповідно до цього, задачами дослідження є: розширення підходів до оцінки варіантів типів ЯР; створення алгоритму їхнього порівняльного аналізу на основі системного підходу; визначення масиву показників та KI для проведення порівняльного аналізу; створення моделі проведення комплексного оцінювання типів ЯР; створення методу визначення оптимального, з точки зору ОПР, типу ЯР.

### 3. Системний підхід до формування методу порівняльного аналізу та вибору оптимального типу ЯР

Метою проведення порівняльного аналізу є вибір оптимального типу ЯР згідно з перевагами ОПР відповідно до різних цілей – економічних, безпекових, соціальних тощо. Оптимальність вибору типу ЯР на основі системного підходу може бути реалізована за рахунок етапності досліджень за алгоритмом, наведеним на рис. 1.

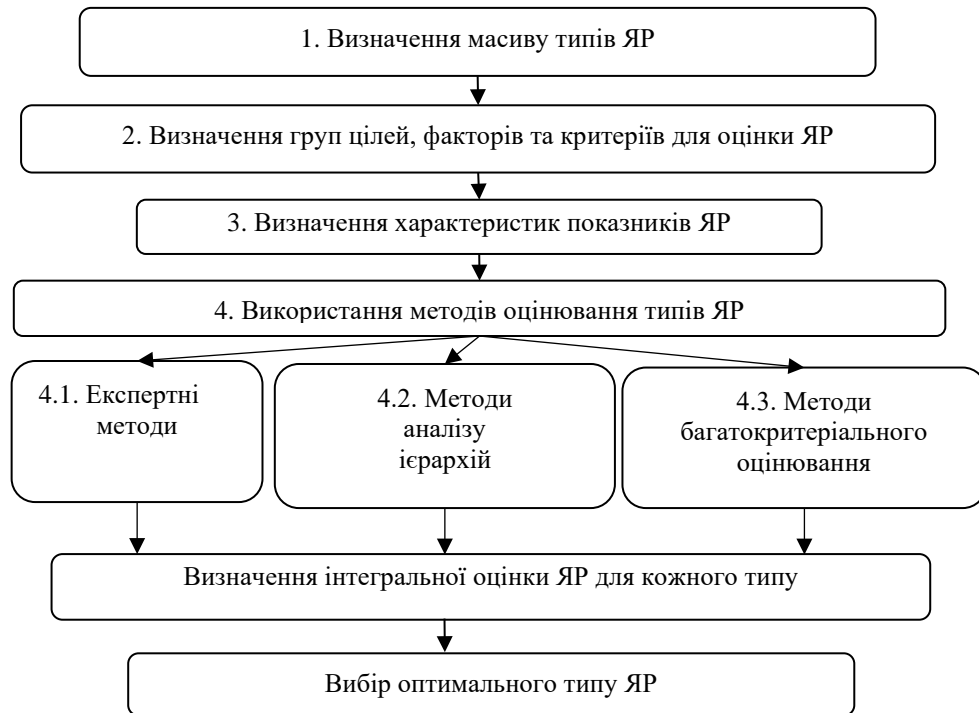


Рис. 1. Алгоритм реалізації задачі розробки методу порівняльного аналізу типів ЯР.

Вибір масиву типів ЯР проводиться з урахуванням схваленої Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. [2], Закону України «Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення» та рекомендацій, викладених у [24].

На основі світового досвіду розвитку ядерної енергетики доцільно розглянути три технології реакторів (PWR, BWR, HWR), які на сьогодні широко розвинені для виробництва електроенергії. Але для реальної реалізації в Україні порівняльне оцінювання може бути обмежене розглядом водно-водяних реакторів під тиском – PWR (presurised water reactor), а саме AP1000 (Westinghouse, США); APR-1000 (KEPCO, Південна Корея); EPR (Франція, AREVA); АТМЕА-1 (Areva/МНІ, Франція/Японія) та Hualong-1 (HPR1000, Китай) [25]. Визначення переліку показників оцінки типів ЯР може бути проведено на основі методів МАГАТЕ INPRO та нормативної документації України.

Оцінка показників проводиться на основі їхньої параметричної та експертної бальної оцінки за обраною шкалою, формується масив вхідних даних для розрахунку комплексної оцінки кожного типу ЯР. Вона є основою для проведення вибору, згідно з перевагами чи вимогами ОПР. Визначення комплексної оцінки базується на використанні таких методів та моделей обробки інформації:

експертні методи, методи аналізу ієрархій (МАІ), методи багатокритеріальної оптимізації (БКО).

Використання експертних методів для якісних критеріїв пропонується виконувати за 9-бальною шкалою. Перевага цієї групи методів – формалізація критеріїв у чисельні оцінки. Недоліки – ретельний підбір експертів, необхідність усунення можливої суб'єктивності в оцінках.

МАІ дають змогу на основі формалізованих оцінок показників проводити їх попарне порівняння, визначати відносні функції цінності й вагові коефіцієнти показників для кожної альтернативи, а також здійснювати оцінювання зважених узагальнених цінностей альтернатив. Перевагою МАІ є можливість встановлення вагових оцінок критеріїв залежно від запитів/вимог ОПР чи експертів. До недоліків слід віднести необхідність перевірки узгодженості попарних порівнянь та їх корегування за необхідності.

Використання методів БКО дає змогу проводити оцінку та порівняння типів ЯР у вигляді комплексних оцінок. Перевагою методів БКО є параметрична деталізація отриманих результатів за групами критеріїв різного рівня цілей, можливість прийняття оптимальних рішень на основі таких оцінок. До недоліків слід віднести труднощі визначення деяких параметричних характеристик альтернатив як за відповідними показниками, так і за їх індикаторами.

Таким чином, використання системного підходу дасть змогу виконати не тільки порівняль-

ний аналіз типів ЯР та їхнє ранжування за комплексним показником, але й враховувати детальні характеристики критеріїв для різних типів ЯР залежно від запитів ОПР та рівня цілей.

**3.1. Формалізація етапів системного підходу**

У табл. 1 наведено перелік груп цілей, показників та їх індикаторів для порівняльного аналізу, сформований у [17] з урахуванням особливостей енергетичного ринку України на основі джерел [18, 19] і нормативної документації України. Наведені показники об'єднано у три основні групи:

- «вартість»  $C (cost)$  – економічні критерії  $E = E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7$ ;
- «технічні характеристики»  $TS (technical specifications)$  з підгрупами: безпека  $S = S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ , технічні показники  $P = P_1, P_2, P_3, P_4$ , референтність  $R = R_1, R_2, R_3$ ;
- «прийнятність»  $A (acceptability)$  – загальний критерій  $G = G_1$ , вплив на персонал  $EN = EN_1$ , інфраструктура  $I = I_1, I_2$ , взаємозв'язок з ядерно-паливним циклом (ЯПЦ)  $N = N_1, N_2$ .

Таблиця 1. Структурований трирівневий перелік показників та їх індикаторів для порівняльного аналізу [18]

Ціль верхнього рівня	Критерій оцінювання	Позначення
Вартість	<i>Економіка</i>	
	Вартість будівництва, у тому числі на проммайданчику, \$/кВт	E1
	Можливість розміщення заміщувальних потужностей на майданчику	E2
	Приведена тривалість будівництва на майданчику, міс/МВт	E3
	Використання принципу стандартизації будівництва	E4
	Використання принципу модульного будівництва	E5
	Об'єм участі національної промисловості та організацій, %	E6
Питоме споживання природного урану, кг/кВт доба	E7	
Технічні характеристики	<i>Безпека</i>	
	Частота пошкодження активної зони (CDF), 1/реактор·рік	S1
	Частота великого викиду радіоактивності (LRF), 1/реактор·рік	S2
	Філософія безпеки	S3
	Наявність спецзаходів із запобігання аварій та обмеження наслідків	S4
	Період відтермінування до втручання оператора, год	S5
	Сейсмостійкість, у частках g	S6
	<i>Технічні показники</i>	
	ККД енергоблока нетто, %	P1
	Коефіцієнт готовності, %	P2
	Маневрені характеристики (глибина розвантаження), %	P3
	Проектний термін експлуатації енергоблока, років	P4
	<i>Референтність</i>	
	Кількість блоків, що перебувають в експлуатації	R1
Кількість енергоблоків, що будуються, та запланованих до будівництва	R2	
Співставність РТ з використовуваною в Україні	R3	
Прийнятність	<i>Загальний критерій</i>	
	Співставність з вимогами ядерної та радіаційної безпеки України	G1
	<i>Вплив на персонал</i>	
	Величина дозового навантаження на персонал, люд.-Зв/реактор·рік	EN1
	<i>Інфраструктура</i>	
	Логістика, можливість доставки різними видами транспорту	I1
	Необхідність створення спеціальної інфраструктури відповідно до вимог типів ЯР	I2
	<i>Взаємозв'язок з ЯПЦ</i>	
	Можливість використання наявної інфраструктури «переднього краю» з урахуванням дій, що плануються на сьогодні	N1
	Можливість використання наявної (створюваної) інфраструктури з поведження з ВЯП	N2

Для оцінки  $i$ -го типу ЯР вводиться «відносна інтегральна функція цінності»  $RISF_i$  (*relative integral significance function*), яка чисельно дорівнює оцінці типу ЯР за всіма групами цілей, показників та їх індикаторів:

$$\left\{ \begin{matrix} RISF_1 \\ \dots \\ RISF_p \end{matrix} \right\} \equiv \left( \begin{matrix} C \left\{ \begin{matrix} E_{1,1}, E_{2,1}, E_{3,1}, E_{4,1}, E_{5,1}, E_{6,1}, E_{7,1} \\ \dots \\ E_{1,p}, E_{2,p}, E_{3,p}, E_{4,p}, E_{5,p}, E_{6,p}, E_{7,p} \end{matrix} \right\}; \\ TS \left\{ \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} S_{1,1}, S_{2,1}, S_{3,1}, S_{4,1}, S_{5,1}, S_{6,1} \\ \dots \\ S_{1,p}, S_{2,p}, S_{3,p}, S_{4,p}, S_{5,p}, S_{6,p} \end{matrix} \right\}, \\ \left\{ \begin{matrix} P_{1,1}, P_{2,1}, P_{3,1}, P_{4,1} \\ \dots \\ P_{1,p}, P_{2,p}, P_{3,p}, P_{4,p} \end{matrix} \right\}, \\ \left\{ \begin{matrix} R_{1,1}, R_{2,1}, R_{3,1} \\ \dots \\ R_{1,p}, R_{2,p}, R_{3,p} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \right\}; A \left\{ \begin{matrix} \left\{ \begin{matrix} G_1 \\ \dots \\ G_p \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} EN_1 \\ \dots \\ EN_p \end{matrix} \right\}, \\ \left\{ \begin{matrix} I_{1,1}, I_{2,1} \\ \dots \\ I_{1,p}, I_{2,p} \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} N_{1,1}, N_{2,1} \\ \dots \\ N_{1,p}, N_{2,p} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \right) \quad (1)$$

де  $p$  – кількість типів ЯР, визначених для оцінювання та порівняльного аналізу.

Використання показника  $RISF_i$ , формалізованого за групами цілей, показниками та індикаторами (1), дає змогу реалізувати послідовно блоки 4.1–4.3 алгоритму (див. рис. 1) та визначити комплексний показник відносної цінності для кожного типу реакторів.

#### 4. Метод комплексного оцінювання та порівняльного аналізу типів ЯР на основі груп цілей верхнього рівня

Реалізація методу комплексного оцінювання та порівняльного аналізу типів ЯР є поетапним процесом. Вхідними даними є масиви кількісних та якісних даних (див. табл. 1), формалізовані в (1). Модель комплексного аналізу типів ЯР, розроблена за [11], представлена на рис. 2.

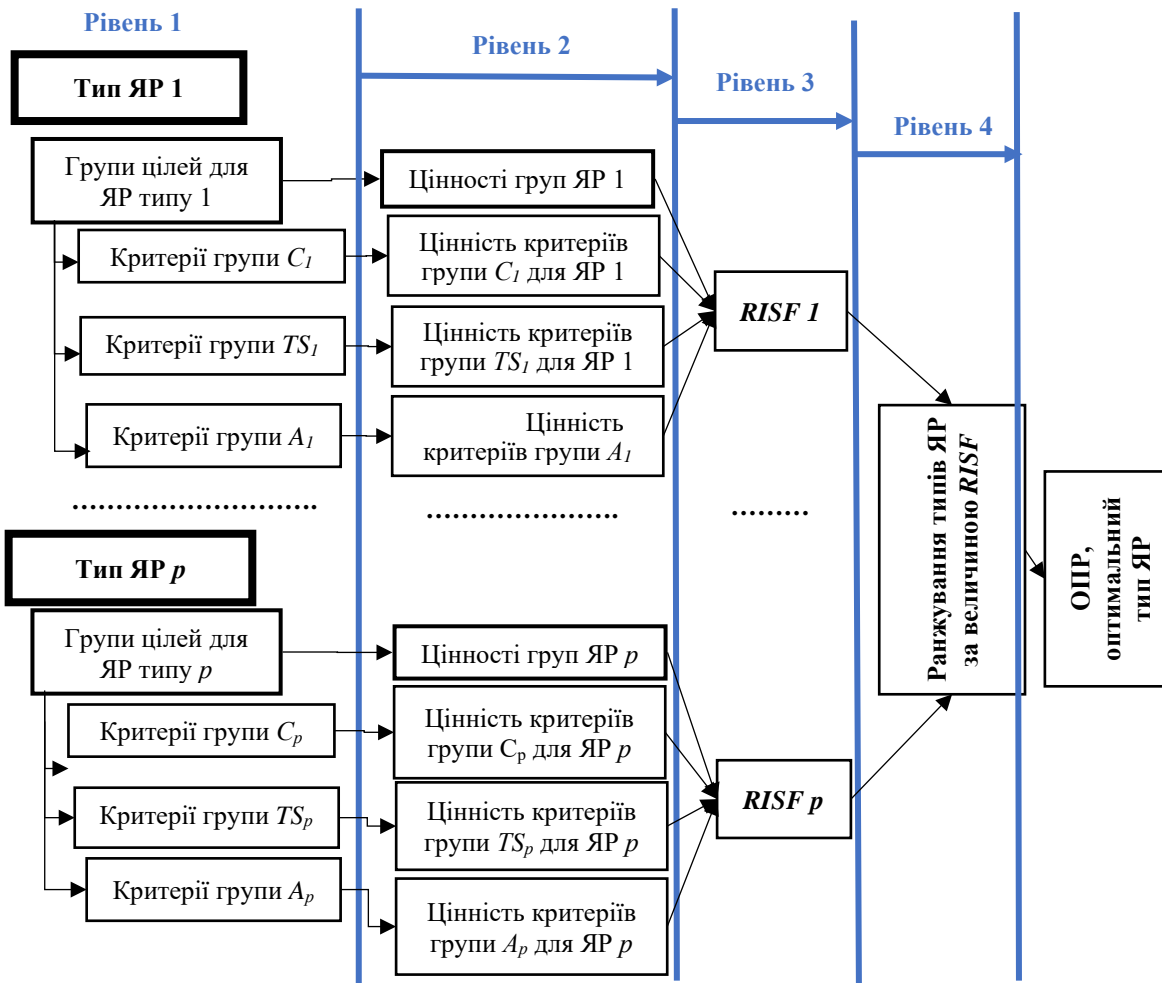


Рис. 2. Модель визначення оптимального типу ЯР.

На рівні 1 проводиться ідентифікація груп цілей та формалізація показників та їх індикаторів. При цьому кількісні оцінки наводяться у відповідних одиницях вимірювання, якісні – визначаються експертно за 9-бальною шкалою. На рівні 2 проводиться визначення ваг чи відносних цінностей складових оцінювання типів ЯР. На рівні 3 проводиться визначення відносної узагальної функції цінності для кожного типу ЯР. На рівні 4 проводиться ранжування типів ЯР за величиною узагальної цінності. Отриманий ранжований ряд є базою для ОПР при виборі оптимального типу ЯР. Детально процес оцінювання та аналізу представлено нижче.

На рівні 1 моделі проводиться:

- формування масивів даних для оцінювання типів ЯР виду (1), їх формалізація. Результатом є перелік груп та підгруп показників; встановлення їх кількісних/якісних характеристик; їхня формалізація у вигляді числових масивів даних; формування трьох груп цілей для  $p$  типів ЯР за показниками (1)  $C$  – «вартість»,  $TS$  – «технічні характеристики»,  $A$  – «прийнятність» (табл. 2);

Таблиця 2. Групи цілей для типів ЯР, які аналізуються

Тип ЯР	ЯР 1	...	ЯР $i$	...	ЯР $p$
Групи цілей	$C_1$	...	$C_i$	...	$C_p$
	$TS_1$	...	$TS_i$	...	$TS_p$
	$A_1$	...	$A_i$	...	$A_p$

- групування показників за групами цілей та їх підгрупами для масиву типів ЯР;

- експертне оцінювання груп та показників у групах за визначеними одиницями вимірювання (для кількісних критеріїв) чи бальними оцінками за визначеною шкалою (для якісних критеріїв). Результатом є кількісні/бальні експертні оцінки груп та показників для  $p$  типів ЯР (табл. 3). Отриманий результат є основою для визначення відносної інтегральної функції цінності  $RISF_i$  для типів ЯР. Реалізація рівнів 2 та 3 може бути проведена за допомогою використання МАІ та БКО.

Таблиця 3. Експертне оцінювання груп цілей та їх критеріїв

ЯР 1		ЯР $i$		ЯР $p$	
Оцінка груп	Оцінка показників	Оцінка груп	Оцінка показників	Оцінка груп	Оцінка показників
$C_1$	$E_{1.1}-E_{7.1}$	$C_i$	$E_{1.i}-E_{7.i}$	$C_p$	$E_{1.p}-E_{7.p}$
$TS_1$	$S_{1.1}-S_{6.1}$ $P_{1.1}-P_{4.1}$ $R_{1.1}-R_{3.1}$	$TS_i$	$S_{1.i}-S_{6.i}$ $P_{1.i}-P_{4.i}$ $R_{1.i}-R_{3.i}$	$TS_p$	$S_{1.p}-S_{6.p}$ $P_{1.p}-P_{4.p}$ $R_{1.p}-R_{3.p}$
$A_1$	$G_{1.1}, EN_{1.1}$ $I_{1.1}-I_{2.1}$ $N_{1.1}-N_{2.1}$	$A_i$	$G_{1.i}, EN_{1.i}$ $I_{1.i}-I_{2.i}$ $N_{1.i}-N_{2.i}$	$A_p$	$G_{1.p}, EN_{1.p}$ $I_{1.p}-I_{2.p}$ $N_{1.p}-N_{2.p}$

**4.1. Використання МАІ для визначення вагових коефіцієнтів груп цілей та їх індикаторів**

Реалізація рівня 2 проводиться поетапно:

- формування за МАІ матриці попарних порівнянь для груп цілей верхнього рівня:

$$MAI^{C,TS,A} = (a_{ij}^{C,TS,A}), \quad (2)$$

де  $a_{ij}^{C,TS,A}$  – перевага  $i$ -го показника цілей над  $j$ -м.

Для  $i$ -го типу ЯР матриця попарних порівнянь має вигляд:

$$MAI_i^{C,TS,A} = \begin{pmatrix} 1 & C_i/TS_i & C_i/A_i \\ TS_i/C_i & 1 & TS_i/A_i \\ A_i/C_i & A_i/TS_i & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У результаті отримано оцінки ваг груп цілей верхнього рівня для  $i$ -го типу ЯР, що визначаються за такими формулами:

$$\Omega_i^C = \frac{\sqrt[3]{1 \cdot (C_i/TS_i) \cdot (C_i/A_i)}}{\sqrt[3]{1 \cdot (C_i/TS_i) \cdot (C_i/A_i) + \sqrt[3]{(TS_i/C_i) \cdot 1 \cdot (TS_i/A_i)} + \sqrt[3]{(A_i/C_i) \cdot (A_i/TS_i) \cdot 1}}}, \quad (4.1)$$

$$\Omega_i^{TS} = \frac{\sqrt[3]{(TS_i/C_i) \cdot 1 \cdot (TS_i/A_i)}}{\sqrt[3]{1 \cdot (C_i/TS_i) \cdot (C_i/A_i) + \sqrt[3]{(TS_i/C_i) \cdot 1 \cdot (TS_i/A_i)} + \sqrt[3]{(A_i/C_i) \cdot (A_i/TS_i) \cdot 1}}}, \quad (4.2)$$

$$\Omega_i^A = \frac{\sqrt[3]{(A_i/C_i) \cdot (A_i/TS_i) \cdot 1}}{\sqrt[3]{1 \cdot (C_i/TS_i) \cdot (C_i/A_i) + \sqrt[3]{(TS_i/C_i) \cdot 1 \cdot (TS_i/A_i)} + \sqrt[3]{(A_i/C_i) \cdot (A_i/TS_i) \cdot 1}}}, \quad (4.3)$$

– формування за МАІ матриць попарних порівнянь показників груп:

$$\begin{cases} MAI^C = (a_{ij}^{C(n)}) \\ MAI^{TS} = (a_{ij}^{TSC(n)}) \\ MAI^A = (a_{ij}^{A(n)}) \end{cases} \quad (5)$$

де  $a_{ij}^{C(n)}$ ,  $a_{ij}^{TS(n)}$ ,  $a_{ij}^{A(n)}$  перевага  $i$ -го показника відповідної групи цілей ( $C$ ,  $TS$ ,  $A$ ) над  $j$ -м.

– для групи цілей  $TS$  – «технічні характеристики»

$$\begin{cases} MAI_{S(i)}^{TS} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{S_{1(i)}}{S_{2(i)}} & \dots & \frac{S_{1(i)}}{S_{6(i)}} \\ \frac{S_{2(i)}}{S_{1(i)}} & 1 & \dots & \frac{S_{2(i)}}{S_{6(i)}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{S_{6(i)}}{S_{1(i)}} & \frac{S_{6(i)}}{S_{2(i)}} & \dots & 1 \end{pmatrix}; & MAI_{P(i)}^{TS} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{P_{1(i)}}{P_{2(i)}} & \frac{P_{1(i)}}{P_{3(i)}} & \frac{P_{1(i)}}{P_{4(i)}} \\ \frac{P_{2(i)}}{P_{1(i)}} & 1 & \frac{P_{2(i)}}{P_{3(i)}} & \frac{P_{2(i)}}{P_{4(i)}} \\ \frac{P_{3(i)}}{P_{1(i)}} & \frac{P_{3(i)}}{P_{2(i)}} & 1 & \frac{P_{3(i)}}{P_{4(i)}} \\ \frac{P_{4(i)}}{P_{1(i)}} & \frac{P_{4(i)}}{P_{2(i)}} & \frac{P_{4(i)}}{P_{3(i)}} & 1 \end{pmatrix}, \\ MAI_R^{TS}(i) = \begin{pmatrix} 1 & R_{1(i)}/R_{2(i)} & R_{1(i)}/R_{3(i)} \\ R_{2(i)}/R_{1(i)} & 1 & R_{2(i)}/R_{3(i)} \\ R_{3(i)}/R_{1(i)} & R_{3(i)}/R_{2(i)} & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

– для групи цілей  $A$  – «прийнятність»

$$MAI_{G,EN,I,N}^A(i) = \begin{pmatrix} 1 & G_{1(i)}/EN_{1(i)} & G_{1(i)}/I_{1(i)} & G_{1(i)}/I_{2(i)} & G_{1(i)}/N_{1(i)} & G_{1(i)}/N_{2(i)} \\ EN_{1(i)}/G_{1(i)} & 1 & EN_{1(i)}/I_{1(i)} & EN_{1(i)}/I_{2(i)} & EN_{1(i)}/N_{1(i)} & EN_{1(i)}/N_{2(i)} \\ I_{1(i)}/G_{1(i)} & I_{1(i)}/EN_{1(i)} & 1 & I_{1(i)}/I_{2(i)} & I_{1(i)}/N_{1(i)} & I_{1(i)}/N_{2(i)} \\ I_{2(i)}/G_{1(i)} & I_{2(i)}/EN_{1(i)} & I_{2(i)}/I_{1(i)} & 1 & I_{2(i)}/N_{1(i)} & S_{4(i)}/N_{2(i)} \\ N_{1(i)}/G_{1(i)} & N_{1(i)}/EN_{1(i)} & N_{1(i)}/I_{1(i)} & N_{1(i)}/I_{2(i)} & 1 & N_{1(i)}/N_{2(i)} \\ N_{2(i)}/G_{1(i)} & N_{2(i)}/EN_{1(i)} & N_{2(i)}/I_{1(i)} & N_{2(i)}/I_{2(i)} & N_{2(i)}/N_{1(i)} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Результатом є оцінка ваг показників для відповідних груп/підгруп цілей для  $i$ -го типу ЯР, визначених за формулою:

$$w_i^{C,TS,A} = \frac{m\sqrt{a_{i1} \dots a_{im}}}{\sum m\sqrt{a_{i1} \dots a_{im}}}, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість показників у відповідній групі;

Для  $i$ -го типу ЯР матриці попарних порівнянь мають вигляд:

– для групи цілей  $C$  – «вартість»

$$MAI^C(i) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{E_{1(i)}}{E_{2(i)}} & \dots & \frac{E_{1(i)}}{E_{7(i)}} \\ \frac{E_{2(i)}}{E_{1(i)}} & 1 & \dots & \frac{E_{2(i)}}{E_{7(i)}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{E_{7(i)}}{E_{1(i)}} & \frac{E_{7(i)}}{E_{2(i)}} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$\sqrt[m]{a_{i1} \dots a_{im}}$  – середнє геометричне рядків матриць попарного порівняння критеріїв (6)–(8);  
 $\sum m\sqrt{a_{i1} \dots a_{im}}$  – сума середніх геометричних рядків матриць (6)–(8).

Таким чином для визначених груп цілей отримаємо вектори відносних цінностей критеріїв, які їх формують (10):

$$w_i^C = \begin{pmatrix} w_{E_{1(i)}} \\ w_{E_{2(i)}} \\ w_{E_{3(i)}} \\ w_{E_{4(i)}} \\ w_{E_{5(i)}} \\ w_{E_{6(i)}} \\ w_{E_{7(i)}} \end{pmatrix}, \quad w_i^{TS} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{S_{1(i)}} \\ w_{S_{2(i)}} \\ w_{S_{3(i)}} \\ w_{S_{4(i)}} \\ w_{S_{5(i)}} \\ w_{S_{6(i)}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} w_{P_{1(i)}} \\ w_{P_{2(i)}} \\ w_{P_{3(i)}} \\ w_{P_{4(i)}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} w_{R_{1(i)}} \\ w_{R_{2(i)}} \\ w_{R_{3(i)}} \end{pmatrix} \end{pmatrix}, \quad w_i^A = \begin{pmatrix} w_{G_{1(i)}} \\ w_{EN_{1(i)}} \\ w_{I_{1(i)}} \\ w_{I_{2(i)}} \\ w_{N_{1(i)}} \\ w_{N_{2(i)}} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Реалізація рівня 3 проводиться в такій послідовності:

– формування вектора комплексних оцінок  $W_i(\Omega, \omega)$ , який містить ваги груп цілей верхнього

рівня ( $\Omega^{C,TS,A}$ ) та ваги показників у межах відповідної групи цілей ( $w_i^{C,TS,A}$ ):

$$W_i = \left[ \langle \Omega^C, (w_{E_{1(i)}}, \dots, w_{E_{7(i)}}) \rangle; \langle \Omega^{TS}, (w_{S_{1(i)}}, \dots, w_{S_{6(i)}}) \rangle; \langle \Omega^A, (w_{G_{1(i)}}, \dots, w_{N_{2(i)}}) \rangle \right]. \quad (11)$$

Результатом є формування масиву ваг  $W_i = \omega, \Omega_i$  для визначення відносної інтегральної функції цінності  $RISF_i$  типів ЯР з урахуванням визначення ваги відповідних показників  $\omega$  та ваг груп цілей  $\Omega$ .

– визначення відносної інтегральної функції цінності  $RISF_i$  типів ЯР за допомогою геометричної зваженої від мультиплікативної згортки виду:

$$RISF_i = \sqrt[3]{\prod \left[ (\omega_i^j)^{\Omega_i^j} \right]} = \sqrt[3]{\left[ (\omega_i^C)^{\Omega_i^C} \right] \cdot \left[ (\omega_i^{TS})^{\Omega_i^{TS}} \right] \cdot \left[ (\omega_i^A)^{\Omega_i^A} \right]}, \quad (12)$$

де  $i = \overline{1, p}$  – номер типу ЯР з досліджуваного переліку типів;  $\omega_i^j$  – ваги показників, які формують відповідну групу цілей;  $\Omega_i^j$  – ваги груп цілей.

Результатом є вектор відносної інтегральної функції цінності  $RISF_i$  типів ЯР:

$$RISF = (RISF_1, \dots, RISF_i, \dots, RISF_p). \quad (13)$$

На рівні 4 моделі проводиться ранжування типів ЯР за величиною їхньої відносної інтегральної функції цінності  $RISF_i$ :

$$rankRISF = \{RISF^* > \dots > RISF^0\}, \quad (14)$$

де  $RISF^* = argmax(RISF)$ ,

$RISF^0 = argmin(RISF)$ .

Вибір найкращого типу ЯР проводиться за критерієм  $RISF^* = argmax(RISF_i)$ . Отриманий результат ОПР використовує для оцінки та прийняття рішень.

#### 4.2. Використання методу БКО

Вхідними даними до реалізації методу для рівнів 2 і 3 моделі (див. рис. 2) є показники, представлені в табл. 1 та поняття «відносна інтегральна функція цінності»  $RISF_i$  формалізоване в (1).

У загальному вигляді багатокритеріальну задачу оцінки типів ЯР можна розглядати як

$$\begin{cases} y_i^* = (\langle E^*_{1(i)} - E^*_{7(i)} \rangle, \langle S^*_{1(i)} - S^*_{6(i)} \rangle, \langle P^*_{1(i)} - P^*_{4(i)} \rangle, \langle R^*_{1(i)} - R^*_{3(i)} \rangle, \langle G^*_{1(i)} - N^*_{2(i)} \rangle) \\ y_i^0 = (\langle E^0_{1(i)} - E^0_{7(i)} \rangle, \langle S^0_{1(i)} - S^0_{6(i)} \rangle, \langle P^0_{1(i)} - P^0_{4(i)} \rangle, \langle R^0_{1(i)} - R^0_{3(i)} \rangle, \langle G^0_{1(i)} - N^0_{2(i)} \rangle). \end{cases} \quad (17)$$

задачу одночасної оптимізації декількох цільових функцій на заданій множині допустимих планів:

$$\begin{cases} RISF_i = f_i(x) \rightarrow opt, \quad i = \overline{1, p}, \\ x \in X \end{cases}, \quad (15)$$

де  $p$  – кількість цільових функцій, що підлягають оптимізації, кількість типів ЯР, які підлягають оцінці;  $f_i$  – окрема  $i$ -та цільова функція з набору ( $i = 1, \dots, p$ );  $f_i(x)$  – окрема цільова функція за групами цілей  $C_{(i)}, TS_{(i)}, A_{(i)}$  для  $i$ -го типу ЯР, визначеним у табл. 1 та виразі (1);  $X$  – множина допустимих планів,  $x = \{C_{(i)}, TS_{(i)}, A_{(i)}\}$  – окремий план з набором показників за групами цілей  $C_{(i)}, TS_{(i)}, A_{(i)}$  для  $i$ -го типу ЯР із множини допустимих планів  $X$ .

Цільовою функцією є максимізація величини  $RISF_i$  на множині типів ЯР, які характеризуються наборами показників, визначених вище. Допустимими планами виступають набори типів ЯР з відповідними значеннями показників за групами цілей. Набори допустимих альтернатив формуються зіставленням оцінок критеріїв із врахуванням допустимих меж варіації для обраних типів ЯР.

Реалізацію методу БКО зручно проводити на основі допоміжної однокритеріальної задачі виду [11, 23]:

$$\begin{cases} RISF_\Sigma = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \rightarrow max/min, \\ f_i(x) \{ \geq \leq \} \psi_i \quad i = \overline{1, p}, \\ x \in X \end{cases}, \quad (16)$$

де  $\alpha_i, \psi_i$  – деякі дійсні числа та векторні критеріальні характеристики, причому знаки перших з них, а також знаки нерівностей у критеріальних обмеженнях узгоджуються з оптимізаційною спрямованістю (до максимуму або до мінімуму) відповідних цільових функцій.

Реалізація рівня 2 моделі (див. рис. 2) для методу БКО для оцінювання та порівняльного аналізу типів ЯР (див. табл. 1, вираз (1)) така:

– для множини допустимих планів (типів ЯР) у межах кожного показника у визначаються найкращі  $y_i^*$  та найгірші  $y_i^0$  значення відповідно

У межах масиву показників формуються цільові межі варіації  $[y_i^0; y_i^*]$  за кожною з цільових функцій за кожним із типів ЯР та визначаються цій на множині ефективних планів (табл. 4).

Таблиця 4. Межі варіації показників на множині типів ЯР

Група цілей	Критерії	Множина типів ЯР (множина ефективних планів)					Найкращі та найгірші значення	
		$x_1$	..	$x_i$	..	$x_p$	$y_i^*$	$y_i^0$
C	$E_1$	$E_{1,1}$		$E_{1,i}$		$E_{1,p}$	$E_1^*$	$E_1^0$
	...	...		...		...	...	...
	$E_7$	$E_{7,1}$		$E_{7,i}$		$E_{7,p}$	$E_7^*$	$E_7^0$
TS	$S_1$	$S_{1,1}$		$S_{1,i}$		$S_{1,p}$	$S_1^*$	$S_1^0$
	...	...		...		...	...	...
	$S_6$	$S_{6,1}$		$S_{6,i}$		$S_{6,p}$	$S_6^*$	$S_6^0$
	$P_1$	$P_{1,1}$		$P_{1,i}$		$P_{1,p}$	$P_1^*$	$P_1^0$
	...	...		...		...	...	...
	$P_4$	$P_{4,1}$		$P_{4,i}$		$P_{4,p}$	$P_4^*$	$P_4^0$
	$R_1$	$R_{1,1}$		$R_{1,i}$		$R_{1,p}$	$R_1^*$	$R_1^0$
	...	...		...		...	...	...
$R_3$	$R_{3,1}$		$R_{3,i}$		$R_{3,p}$	$R_3^*$	$R_3^0$	
A	$G_1$	$G_{1,1}$		$G_{1,i}$		$G_{1,p}$	$G_1^*$	$G_1^0$
	...	...		...		...	...	...
	$N_2$	$N_{2,1}$		$N_{2,i}$		$N_{2,p}$	$N_2^*$	$N_2^0$

– визначення вагових коефіцієнтів для показників, які формують комплексну зважену інтегральну функцію цінності  $RISF_\Sigma$  для відповідного  $i$ -го типу ЯР

$$\begin{cases} \alpha_i = \left| \frac{1}{y_i^* - y_i^0} \right|, i = 1, \dots, p \\ \alpha = (\alpha_{E_1}, \dots, \alpha_{E_7}; \alpha_{S_1}, \dots, \alpha_{S_6}; \alpha_{P_1}, \dots, \alpha_{P_4}; \alpha_{R_1}, \dots, \alpha_{R_3}; \alpha_{G_1}, \dots, \alpha_{N_2}). \end{cases} \quad (18)$$

На рівні 3 моделі проводять такі дії:

– визначення зважених значень показників  $\alpha_i f_i(x)$  усієї множини допустимих планів  $X$  (табл. 5);

– визначення на основі табл. 5 комплексних зважених інтегральних функцій цінностей типів ЯР  $RISF_\Sigma$  для всієї множини допустимих планів  $X$ :

$$RISF_\Sigma = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x). \quad (19)$$

У результаті отримуємо вектор зважених інтегральних функцій цінності  $RISF_i$  (20) для всіх типів ЯР, які включені в дослідження:

$$RISF_\Sigma = (RISF_{\Sigma_1}, \dots, RISF_{\Sigma_i}, \dots, RISF_{\Sigma_p}). \quad (20)$$

Таблиця 5. Зважені значення критеріїв оцінки типів ЯР

Група цілей	Зважені показники	Множина типів ЯР (множина ефективних планів)				
		$x_1$	..	$x_i$	..	$x_p$
C	$\alpha_{E_1} E_1$	$\alpha_{E_1} E_{1,1}$		$\alpha_{E_1} E_{1,i}$		$\alpha_{E_1} E_{1,p}$
	...	...		...		...
	$\alpha_{E_7} E_7$	$\alpha_{E_7} E_{7,1}$		$\alpha_{E_7} E_{7,i}$		$\alpha_{E_7} E_{7,p}$
TS	$\alpha_{S_1} S_1$	$\alpha_{S_1} S_{1,1}$		$\alpha_{S_1} S_{1,i}$		$\alpha_{S_1} S_{1,p}$
	...	...		...		...
	$\alpha_{S_6} S_6$	$\alpha_{S_6} S_{6,1}$		$\alpha_{S_6} S_{6,i}$		$\alpha_{S_6} S_{6,p}$
	$\alpha_{P_1} P_1$	$\alpha_{P_1} P_{1,1}$		$\alpha_{P_1} P_{1,i}$		$\alpha_{P_1} P_{1,p}$
	...	...		...		...
	$\alpha_{P_4} P_4$	$\alpha_{P_4} P_{4,1}$		$\alpha_{P_4} P_{4,i}$		$\alpha_{P_4} P_{4,p}$
	$\alpha_{R_1} R_1$	$\alpha_{R_1} R_{1,1}$		$\alpha_{R_1} R_{1,i}$		$\alpha_{R_1} R_{1,p}$
	...	...		...		...
$\alpha_{R_3} R_3$	$\alpha_{R_3} R_{3,1}$		$\alpha_{R_3} R_{3,i}$		$\alpha_{R_3} R_{3,p}$	

Група цілей	Зважені показники	Множина типів ЯР (множина ефективних планів)				
		$x_1$	..	$x_i$	..	$x_p$
A	$\alpha_{G1} G_1$	$\alpha_{G1} G_{1,1}$		$\alpha_{G1} G_{1,i}$		$\alpha_{G1} G_{1,p}$
	...	...		...		...
	$\alpha_{N2} N_2$	$\alpha_{N2} N_{2,1}$		$\alpha_{N2} N_{2,i}$		$\alpha_{N2} N_{2,p}$
Зважені інтегральні функції цінностей		$RISF_{\Sigma}(1)$	...	$RISF_{\Sigma}(i)$	...	$RISF_{\Sigma}(p)$

Таким чином усі типи ЯР описуються однозначно безрозмірною величиною функції цінностей  $RISF_{\Sigma_i}$ , за величиною якої проводиться ранжування типів ЯР на рівні 4 моделі (див. рис. 2):

$$rankRISF_{\Sigma} \equiv \{RISF_{\Sigma}^* > \dots > RISF_{\Sigma}^0\}, \tag{21}$$

де  $RISF_{\Sigma}^* = argmax(RISF_{\Sigma})$ ,

$$RISF_{\Sigma}^0 = argmin(RISF_{\Sigma}).$$

На векторі зважених інтегральних функцій цінностей типів ЯР (20) визначається такий ефективний план (тип ЯР), який відповідає максимуму зваженої інтегральної функції цінності. Його оцінка  $y^{(1)} = f(x^{(1)})$  є оптимальною на заданій множині і разом з кількісними та якісними значеннями показників передається ОПР, вказаний тип ЯР визначається як оптимальний та пропонується до вибору.

Таким чином реалізація запропонованого методу дає змогу на основі використання експертних методів провести комплексну якісну оцінку типів ЯР, на основі методу БКО провести деталізацію параметрів типів ЯР, ранжованих за відносною цінністю та врахувати вимоги ОПР щодо характеристик показників та їх індикаторів.

### 5. Висновки

У рамках дослідження розглянуто рекомендовані МАГАТЕ методи для виконання порівняльного аналізу та оптимального вибору ЯЕС, ЯТ та типів ЯР. Описані методи розроблено за результатами реалізації міжнародних проектів INPRO: KIND, CENESO тощо.

З урахуванням зауваження щодо того, що формування показників та індикаторів для аналізу здійснюється з урахуванням національних особливостей країн-членів МАГАТЕ, проведено коригування та модифікацію рекомендованих методологій. Розширення підходів до оцінки типів ЯР проведено за рахунок комплексного використання МАІ для узгодження експертних оцінок, визначення ваг показників та їх індикаторів на кожному рівні дерева цілей, включення обох класів ваг у комплексну узагальнену оцінку типів ЯР. Для структуризації та етапності досліджень розроблено алгоритм системного підходу до порівняльного аналізу та визначення оптимального типу ЯР, формалізовано етапи системного підходу до порівняльного аналізу на трьох рівнях цілей. Для реалізації алгоритму на основі національних нормативних документів сформовано структурований трирівневий перелік показників та КІ для порівняльного аналізу типів ЯТ та ЯР. На основі розробленого алгоритму та визначеного переліку показників та КІ розроблено модель комплексного оцінювання типів ЯР з урахуванням як параметричних (кількісних), так і непараметричних (якісних) показників та індикаторів. Розроблено удосконалений метод проведення комплексного оцінювання типів ЯР на основі комплексної зваженої інтегральної функції цінностей, яка включає в себе оцінки ваг груп цілей (показників) та КІ. Такий підхід на погляд авторів дає змогу проводити більш детальну оцінку альтернатив.

Впровадження запропонованого методу дасть можливість провести комплексну якісну оцінку типів ЯР на основі їх параметричних показників та експертних оцінок якісних показників; деталізувати параметри, ранжовані за відносною цінністю типів ЯР на основі методу БКО та врахувати вимоги ОПР.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. А.В. Носовський, В.І. Борисенко. Щодо будівництва нових ядерних енергоблоків в Україні. *Ядерна енергетика та довкілля* 1(23) (2022) 3. / V.I. Borysenko, A.V. Nosovskyi. On the construction of new nuclear power units in Ukraine. *Nuclear Power and the Environment* 1(23) (2022) 3. (Ukr)
2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р (станом на 21.04.2023 р.) / On Approval of the Energy Strategy of Ukraine until 2035 “Security,

- Energy Efficiency, Competitiveness”. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 18, 2017 No. 605-r (as amended on April 21, 2023). (Ukr)
3. Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.20 (Vienna: IAEA, 2019) 229 p.
  4. International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO).
  5. Application of multi-criteria decision analysis methods to comparative evaluation of nuclear energy system options. INPRO Collaborative Project “Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems” (Vienna: IAEA, 2020) 28 p.
  6. Advanced Reactor Information System.
  7. IAEA. Advanced Reactor Information System (ARIS). Technical Data.
  8. IAEA. Advanced Reactor Information System (ARIS). Characteristics.
  9. Comparative evaluation of nuclear energy system options: Final report of the INPRO collaborative project CENESO (Vienna: IAEA, 2023) 470 p.
  10. Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку атомно-промислового комплексу на період до 2026 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2021 № 1804-р (станом на 18.12.2024 р.) / On Approval of the Concept of the State Target Economic Program for the Development of the Nuclear-Industrial Complex for the Period up to 2026. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of December 29, 2021 No. 1804-r (as amended on December 18, 2024). (Ukr)
  11. В.В. Деренговський, І.С. Скітер. Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об’єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію. *Ядерна енергетика та довкілля* 1(23) (2022) 45. / V.V. Derenhovskiy, I.S. Skiter. 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* 1(23) (2022) 45. (Ukr)
  12. The Western European Nuclear Regulators Association (WENRA). Publications.
  13. European Utility Requirements Association.
  14. IAEA Safety Standards.
  15. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine. Nuclear Legislation. Legal Acts.
  16. *Indicators for Nuclear Power Development* (Vienna: IAEA, 2015) 108 p.
  17. С.М. Неаронов та ін. Дослідження вибору реакторної технології для будівництва заміщуючих та нових енергоблоків АЕС в Україні після 2035 р. *Ядерна енергетика та довкілля* 3(18) (2020) 10. / Y.M. Niaronov et al. Reactor technology rationale for construction of substitution and new power units in Ukraine after 2035. *Nuclear Power and the Environment* 3(18) (2020) 10. (Ukr)
  18. *Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems*. INPRO Manual – Overview of the Methodology (Vienna: IAEA, 2008) 136 p.
  19. *Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS* (Vienna: IAEA, 2013) 253 p.
  20. Н. Тагердоост, М. Маданчян. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia* 3(1) (2023) 77.
  21. V. Kuznetsov et al. Innovative nuclear energy systems: State-of-the art survey on evaluation and aggregation judgment measures applied to performance comparison. *Energies* 8(5) (2015) 3679.
  22. В.В. Деренговський, А.В. Носовський. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об’єктів із радіаційно-ядерними технологіями. *Ядерна фізика та енергетика* 19 (2018) 166. / V.V. Derengovskiy, A.V. Nosovskiy. Improved method of multi-criteria analysis of environmental safety of objects with radiation-nuclear technologies. *Nucl. Phys. At. Energy* 19 (2018) 166. (Ukr)
  23. I.S. Skiter, V.V. Derenhovskiy. Analysis of scenarios for transforming the object “Ukryttya” into an environmentally safe system by the method of multicriteria optimization. *Nucl. Phys. At. Energy* 25 (2024) 47.
  24. Н.І. Власенко, О.В. Годун, В.Я. Шендерович. Предложения по формированию критериев выбора проектов новых энергоблоков АЭС Украины. *Ядерна та радіаційна безпека* 1(73) (2017) 10. / N.I. Vlasenko, O.V. Godun, V.Ya. Shenderovych. Proposals for forming criteria for the selection of new nuclear power unit projects for Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety* 1(73) (2017) 10. (Rus)
  25. К.Б. Денисевич та ін. Наук. ред. Ю.О. Ландау, І.Я. Сігал. *Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розвиток атомної енергетики та об’єднаних енергосистем* (Київ, 2013) 304 с. / K.B. Denisevych et al. Yu.O. Landau, I.Ya. Sigal (Eds.). *Energy: History, Present, and Future. Development of Nuclear Power and Integrated Energy Systems* (Kyiv, 2013) 304 p. (Ukr)

**A. Nosovskyi, I. Skiter\*, V. Derengovskyi, V. Rudko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: [i.skiter@ispnpp.kiev.ua](mailto:i.skiter@ispnpp.kiev.ua)

### **IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR OPTIMAL SELECTION OF THE TYPE OF NUCLEAR REACTOR**

The article presents a model for comprehensive assessment and improvement of the comparative analysis method for nuclear reactor types in Ukraine, based on the methods proposed in the KIND and CENESO projects. The formation of key and auxiliary sets of indicators for analysis was carried out in accordance with the recommendations of IAEA regulatory documents and taking into account the national characteristics of Ukraine's energy system. The stages of a systematic approach to comparative analysis were formalized, and an evaluation algorithm based on attributes and their indicators was developed. The purpose of improving the method is the need to simultaneously take into account quantitative and qualitative attributes and their indicators, use adequate methods for determining their weights, and develop methods for the comprehensive evaluation of attributes and their indicators. The developed modifications of the analysis methods make it possible to determine the relative values of nuclear reactor types, taking into account expert assessments and the requirements of decision-makers. A weighted "generalized integral value function" was proposed for the comprehensive assessment of nuclear reactor types. The developed improved method is based on a systematic approach, the formation of an array of quantitative and qualitative attributes and their indicators for the corresponding groups of objectives, the method of hierarchy analysis, and the method of multi-criteria optimization. The detailing of the parameters of nuclear reactor types makes it possible to take into account the requirements of decision-makers regarding technical, economic, safety, and other attributes and their indicators.

*Keywords:* nuclear reactor types, INPRO method, key indicators, comparative analysis, systematic approach, expert assessment, weighting coefficients, generalized value function, comprehensive assessment of alternatives, optimal choice, decision-making.

Надійшла / Received 11.12.2025