

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01>

УДК 658.62.018.012

¹ГРІНЧЕНКО Г. С., кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

¹ЛИСЕНКО А. Я.,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: dagost@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3916-8029>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

КВАЛІМЕТРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС НА ОСНОВІ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

Стаття присвячена актуальній науково-практичній проблемі розроблення та обґрунтування методичного підходу до комплексного оцінювання якості функціонування енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). В умовах зростання вимог до ядерної безпеки та необхідності подовження термінів експлуатації енергообладнання, традиційні методи, що базуються на окремих техніко-економічних показниках, виявляються недостатніми для адекватного відображення стану складних технічних систем. Авторами запропоновано інтеграцію кваліметричних методів аналізу з принципами ризик-орієнтованого підходу, що дозволяє не лише фіксувати поточні параметри системи, але й враховувати потенційні загрози та синергетичні ефекти їх взаємодії. У роботі проведено критичний аналіз наукових підходів до забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС в Україні та світового досвіду застосування багатокритеріального аналізу (MCDA) в енергетиці. Виявлено, що ключовою проблемою є відсутність єдиної методології, яка б поєднувала кількісні технічні параметри з якісними характеристиками, такими як культура безпеки чи організаційна ефективність. На основі системного підходу сформовано багаторівневу систему з 49 показників, структурованих за сімома категоріями: технічні, економічні, соціальні, організаційні, етичні, інформаційні та екологічні. Особливістю системи є її адаптивність до внутрішніх (модернізація, кадри) та зовнішніх (кіберзагрози, нормативні зміни) чинників. Методологічна частина дослідження описує процес визначення вагомості показників із застосуванням експертних груп та статистичних методів. Для підвищення об'єктивності оцінок запропоновано використання медіанних значень та моди, що дозволяє нівелювати вплив аномальних експертних думок. Важливим науковим результатом є застосування графового підходу для моделювання взаємозв'язків між показниками. Побудована орієнтована графова модель та матриця суміжності дозволяють ідентифікувати «вузлові» параметри, зміна яких спричиняє каскадний вплив на безпеку всього енергоблоку. Інтерпретація результатів моделювання вказує на те, що якість функціонування АЕС є функціональною залежністю від поточного стану та сукупності асоційованих ризиків. Запропонований підхід забезпечує наукове підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо модернізації обладнання та управління експлуатаційним ресурсом, враховуючи нелінійний характер взаємодії факторів у системах підвищеної небезпеки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: атомна електростанція, енергоблок, кваліметричне оцінювання, ризик-орієнтований підхід, інтегральний показник якості, експлуатаційна безпека, графова модель.

Як цитувати: Грінченко Г. С., Лисенко А. Я. Кваліметричне оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС на основі ризик-орієнтованого підходу. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 6-23. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01>



Вступ

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується зростанням вимог до надійності, безпеки та ефективності функціонування складних технічних систем, зокрема енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). В умовах підвищеної техногенної небезпеки, жорстких регуляторних вимог та необхідності забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору особливого значення набуває впровадження науково обґрунтованих підходів до оцінювання якості функціонування таких об'єктів, що супроводжується рядом факторів, як зовнішнього, так і внутрішнього впливу, і які необхідно врахувати при плануванні стратегії управління енергоблоками АЕС.

Сучасні підходи до оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС в Україні переважно базуються на вико- ристанні окремих техніко-економічних або експлуатаційних показників, які характеризують технічний стан та стабільність функціонування певного обладнання, визначають критерій і об'єкти моніторингу при модернізації та перепризначенні термінів експлуатації, враховують обмежений перелік індикаторів що на пряму має вплив на безпеку експлуатації АЕС, спрямовані на енергоефективність, як основний показник функціонування, тощо [1-5]. Такі підходи забезпечують регуляторні вимоги, що висувуються міжнародними організаціями з забезпечення атомного регулювання, національними нормами у сфері енергетичної

безпеки та внутрішніми документами з проведення робіт і забезпечення безпеки на АЕС, але при цьому не дозволяють повною мірою врахувати багатофакторний характер їх функціонування та часто не інтегрують показники ризику, що є критично важливим для об'єктів підвищеної небезпеки, врахування яких особливо важливо при розробці ефективних механізмів управління енергоблоком з точки зору складної технічної системи.

Для розробки ефективних механізмів управління енергоблоком АЕС перспективним напрямом є застосування кваліметричних методів, які дозволяють здійснювати комплексне оцінювання якості функціонування технічних систем шляхом формування інтегральних показників на основі сукупності часткових критеріїв. Водночас сучасні тенденції розвитку управління технічними системами передбачають активне впровадження ризикорієнтованого підходу, який базується на ідентифікації, аналізі та врахуванні потенційних загроз і невизначеностей. Поєднання кваліметричного підходу з принципами управління ризиками відкриває нові можливості для підвищення об'єктивності, достовірності та практичної значущості оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС, що дозволяє не лише оцінити поточний стан системи, але й врахувати потенційні ризики її функціонування, що є важливим для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика оцінювання ефективності та сталості функціонування енергетичних систем, зокрема з урахуванням ризиків, активно досліджується в сучасній науковій літературі. Одним із ключових напрямів є розвиток багатокритеріальних підходів до оцінювання енергетичних систем, що дозволяють інтегрувати технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Зокрема, у роботах [6,7] проаналізовано та запропоновано інтегрований багатокритеріальний підхід до оцінювання енергетичного переходу в країнах ЄС, який базується на використанні широкого спектра індикаторів та методів

зважування, що враховує сучасні виклики, які спричинені зміною клімату, глобальним потеплінням, викидами парникових газів та іншими причинами, що спонукали країни усього світу до переходу на низьковуглецеві енергетичні системи. В результаті систематичного огляду літератури авторами було визначено сімнадцять викликів, які було класифіковано за п'ятьма групами: економічні, інституційні, технічні, соціальні та екологічні. Згодом було обрано п'ятдесят три показники для вимірювання ефективності ЄС у подоланні викликів. Крім того, для визначення суб'єктивної ваги виявлених викликів було застосовано метод

Ферма «Покроковий аналіз коефіцієнтів оцінки ваги», тоді як для визначення об'єктивної ваги обраних показників було застосовано метод, заснований на ефектах видалення критеріїв. Після цього було застосовано метод «Техніка визначення порядку переваг за схожістю з ідеальним рішенням» для оцінки ефективності дій ЄС у вирішенні викликів переходу до низьковуглецевої енергетики у 2015 та 2020 роках. Результати показали, що енергетична справедливість, витрати на пом'якшення наслідків, землекористування та відсутність інфраструктури є найважливішими соціальними, економічними, екологічними, інституційними та технічними викликами. Такий підхід показав цікаві результати в оцінюванні країн, та дав більш точну оцінку дійсної картини та перспектив подальшого розвитку енергетичного сектору, та може бути основою для оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС.

Планування та оцінювання технічних систем шляхом застосування ризик-орієнтованих підходів широко застосовується у практиці та наукових дослідженнях, а також є частиною системи управління якістю згідно міжнародних стандартів [8, 9], що створює сприятливу основу для активного впровадження цих підходів на підприємствах і організаціях різного рівня. Водночас значна увага в наукових роботах приділяється застосуванню ризик-орієнтованих підходів у плануванні та оцінюванні енергетичних систем і показано, що ризики в даних системах мають багатовимірний характер і включають технічні, економічні, політичні та соціальні компоненти, а для їх оцінювання використовуються як кількісні методи (стохастичне моделювання, Monte Carlo), так і напівкількісні (багато критеріальний аналіз, сценарні підходи) [10-14]. Разом з тим, сучасні дослідження також акцентують увагу на необхідності інтеграції різних груп показників у єдині системи оцінювання. Зокрема, у роботах, присвячених оцінюванню сталості енергетичних технологій, підкреслюється, що традиційні підходи (наприклад, LCA) не забезпечують повного врахування всіх аспектів сталості, що зумовлює необхідність розроблення інтегрованих методологій оцінювання [15-17].

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені використанню

багатокритеріального аналізу (MCDA) для оцінювання енергетичних систем, який MCDA дозволяє ефективно поєднувати різноманітні показники та формувати інтегральні оцінки, однак вибір індикаторів і методів зважування залишається складним науковим завданням [18-20]. Так в роботі [18] наведено сфери застосування методу багатокритеріального аналізу прийняття рішень, та підтверджено дієвість цього методу для підтримки прийняття рішень у сфері енергетики та оцінці стійкості енергетичних технологій та систем в рамках Асоціації Гельмгольца - мережі німецьких дослідницьких центрів, що займаються важливими темами, від досліджень раку до полярної науки. Однак, суттєвим недоліком методу багато критеріального аналізу прийняття рішень, відсутність чітких рекомендацій щодо вибору найбільш підходящого підходу до визначення критеріїв, а саме ранжування, сортування, вибору та кластеризації альтернатив (наприклад, технологій або сценаріїв), що підлягають оцінці [19, 20]. Для застосування методу багато критеріального аналізу, автори [20] зазначають необхідність чіткого представлення як обирати та визначати критерії й індикатори, які методи інтерпретації застосовувати, як визначати вагові коефіцієнти та не обхідність управління невизначеністю, вирішення питання несумісності, компенсації та несумісності критеріїв, тобто, огляд показує необхідність підвищення методологічної прозорості, наприклад, надання інформації про те, як обиралися альтернативи, критерії та індикатори і чому певні методи обираються на користь інших. Крім того, рекомендується, щоб при проведенні багатокритеріальних оцінок використовувалися методи інтерпретації, які передбачають несумісність або слабку сумісність критеріїв, з метою дотримання плюралізму цінностей сталого розвитку та дотримання концепції сильного сталого розвитку. Вибір вагових коефіцієнтів, є окремим питанням деяких робіт, так в роботі [21] запропоновано підхід до оцінювання ризиків енергетичних систем на основі комбінованих вагових коефіцієнтів (ентропійний метод, CRITIC) та методу TOPSIS, що дозволяє підвищити об'єктивність результатів оцінювання.

Сучасні дослідження також підкреслюють важливість урахування ризиків у забезпеченні енергетичної безпеки та надійності систем, а саме, що формування системи індикаторів енергетичної безпеки повинно базуватися на комплексному врахуванні загроз та невизначеностей функціонування енергетичних систем [22]. Авторами представлено методологію оцінки енергетичної безпеки з точки зору стійкості енергетичної системи до збурень, яка слугує комплексною основою для оцінки енергетичної безпеки. Запропонована модель розширює можливості традиційних інструментів моделювання енергетичної системи, додаючи здатність моделювати енергетичну систему в умовах стохастичних зривів та пропонує показник енергетичної безпеки, основною метою якого є кількісна оцінка енергетичної безпеки для майбутніх сценаріїв розвитку або шляхів розвитку енергетичної системи з точки зору її стійкості. По суті в роботі пропонується методологія в основі якої полягає аналіз нових загроз, зривів та пов'язаних з ними наслідків для енергетичних систем у поєднанні з інструментом моделювання енергетичної системи OSeMOSYS.

Разом із тим, аналіз наукових джерел показує, що, незважаючи на значний

розвиток багатокритеріальних і ризик-орієнтованих підходів, існує низка невирішених проблем, а саме відсутня єдина методологія інтеграції кваліметричних підходів та ризик-аналізу, недостатньо розроблені підходи до формування інтегральних показників якості функціонування складних технічних систем, зокрема енергоблоків АЕС, обмежено враховується вплив ризиків на узагальнені показники якості, існує проблема обґрунтування вагових коефіцієнтів та забезпечення відтворюваності результатів. Таким чином, існує об'єктивна необхідність у розробленні науково обґрунтованого підходу до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС із урахуванням ризик-орієнтованих принципів, що й визначає актуальність даного дослідження.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування науково-методичного підходу до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоку атомної електростанції на основі ризик-орієнтованого підходу, що передбачає формування інтегрального показника якості з урахуванням технічних, експлуатаційних та ризикових факторів для підвищення обґрунтованості управлінських рішень у процесі експлуатації енергетичних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Енергоблок атомної електростанції є складною технічною системою з високим рівнем потенційної небезпеки, функціонування якої визначається сукупністю взаємопов'язаних технічних, організаційних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних та етичних факторів. Особливістю таких систем є їх багаторівнева структура, наявність значної кількості внутрішніх і зовнішніх зв'язків, а також чутливість до впливу невизначеностей і ризиків різної природи. Існуючі підходи до оцінювання функціонування енергоблоків, як правило, базуються на аналізі окремих технічних або економічних показників, що не дозволяє адекватно відобразити складність процесів, які відбуваються в системі. Крім того, такі підходи обмежено враховують нелінійний характер взаємодії факторів, їх синергетичний ефект, а також вплив ризиків, що виникають як у

результаті внутрішніх відхилень у роботі системи, так і під дією зовнішніх чинників. У цьому контексті доцільним є застосування кваліметричного підходу, який передбачає системне оцінювання якості функціонування об'єкта на основі сукупності кількісних і якісних показників. На відміну від класичних методів, кваліметрія дозволяє інтегрувати різноманітні характеристики, враховувати експертні оцінки та формалізувати слабо структуровані параметри, зокрема такі, як організаційна ефективність, культура безпеки або рівень інформаційної забезпеченості.

Водночас специфіка об'єктів атомної енергетики обумовлює необхідність обов'язкового врахування ризиків при оцінюванні їх функціонування. Ризики у даному випадку мають комплексний характер і включають технічні відмови,

людський фактор, організаційні недоліки, інформаційні загрози та зовнішні впливи. Важливою особливістю є те, що зазначені ризики не є незалежними, а перебувають у складній взаємодії, що може призводити до ефектів посилення або, навпаки, часткового взаємного компенсування.

Таким чином, якість функціонування енергоблоку АЕС доцільно розглядати як результат взаємодії двох ключових складових: поточного стану системи, що описується множиною показників, та ризиків, які впливають на стабільність і безпеку її роботи. У загальному вигляді це може бути представлено як функціональна залежність:

$$Q = f(X, R),$$

де X — множина параметрів, що характеризують різні аспекти функціонування енергоблоку,

R — сукупність ризиків, пов'язаних із його експлуатацією.

На відміну від спрощених моделей, у запропонованому підході множина X формується як багатовимірний простір показників, згрупованих за функціональною ознакою, а ризики R розглядаються як похідні від цих показників із урахуванням їх взаємозв'язків. Це дозволяє врахувати не лише прямий вплив окремих факторів, але й їх опосередковану дію через систему внутрішніх залежностей. Ключовою особливістю запропонованої методики є врахування синергетичного ефекту взаємодії показників. Зміна одного параметра може призводити до каскадних змін інших характеристик системи, що особливо характерно для об'єктів підвищеної небезпеки. Тому оцінювання здійснюється не ізольовано для кожного показника, а з урахуванням структури їх взаємозв'язків.

Запропонований підхід дозволяє комплексно враховувати різноманітні фактори, що впливають на функціонування енергоблоку, поєднувати кількісні та якісні показники в єдиній системі оцінювання, враховувати вплив як внутрішніх, так і зовнішніх ризиків, аналізувати взаємозв'язки та синергетичні ефекти між показниками, підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо експлуатації енергоблоків АЕС.

Для реалізації запропонованого підходу необхідним є формування багаторівневої системи показників, яка дозволяє комплексно відобразити особливості функціонування енергоблоку АЕС з урахуванням його технічної складності, потенційної небезпечності та впливу широкого спектра внутрішніх і зовнішніх факторів.

Сформована система показників має адаптивний характер і може змінюватися залежно від умов функціонування об'єкта. Зокрема, вона враховує:

- внутрішні фактори (модернізація обладнання, зміна режимів експлуатації, перепризначення термінів ремонту, кадрові зміни, впровадження нових технологій тощо);

- зовнішні фактори (зміни нормативно-правового середовища, ринкові умови, геополітичні ризики, екологічні вимоги, кіберзагрози тощо).

Такий підхід забезпечує гнучкість системи оцінювання та її здатність до актуалізації відповідно до реальних умов експлуатації енергоблоку. З урахуванням багатопараметричності об'єкта дослідження показники згруповано за такими основними категоріями: технічні, економічні, соціальні, організаційні, етичні, інформаційні та екологічні (табл. 1).

Таблиця 1
Система показників кваліметричного оцінювання
Table 1
System of indicators for qualimetric assessment

Показник оцінювання	Вплив (внутрішній/зовнішній)	Тип оцінювання (кількісна/ якісна)
Технічні		
Коефіцієнт готовності обладнання	внутрішній	кількісна
Частота відмов		кількісна
Коефіцієнт використання встановленої потужності	внутрішній	кількісна
Рівень фізичного зносу обладнання	внутрішній	кількісна
Тривалість простоїв	внутрішній	кількісна
Показники ядерної та радіаційної безпеки	внутрішній	кількісна
Надійність систем охолодження	внутрішній	кількісна
Стан систем захисту	внутрішній	кількісна
Економічні		
Собівартість виробництва електроенергії	внутрішній/зовнішній	кількісна
Витрати на технічне обслуговування	внутрішній	кількісна
Втрати від простоїв	внутрішній	кількісна
Інвестиції у модернізацію	внутрішній	кількісна
Рівень фінансової стійкості	зовнішній	кількісна
Економічна ефективність експлуатації	внутрішній	кількісна
Рівень штрафних санкцій	зовнішній	кількісна
Соціальні		
Рівень кваліфікації персоналу	внутрішній	кількісна/ якісна
Плинність кадрів	внутрішній	кількісна
Рівень виробничого травматизму	внутрішній	кількісна
Культура безпеки	внутрішній	якісна
Рівень стресу персоналу	внутрішній	якісна
Соціальна стабільність колективу	внутрішній	якісна
Рівень підготовки до аварійних ситуацій	внутрішній	якісна
Організаційні		
Ефективність управління	внутрішній	якісна
Якість планування ремонтів	внутрішній	кількісна
Рівень регламентованості процесів	внутрішній	якісна
Швидкість прийняття рішень	внутрішній	кількісна
Рівень внутрішнього контролю	внутрішній	якісна
Відповідність стандартам	зовнішній	якісна
Гнучкість організаційної структури	внутрішній	якісна
Етичні		
Дотримання норм безпеки	внутрішній	якісна
Прозорість діяльності	зовнішній	якісна
Відповідальність керівництва	внутрішній	якісна
Дотримання міжнародних вимог	зовнішній	якісна
Етичність прийняття рішень	внутрішній	якісна
Відкритість до аудиту	зовнішній	якісна
Інформаційні		
Якість даних моніторингу	внутрішній	кількісна
Швидкість обробки інформації	внутрішній	кількісна
Рівень цифровізації	внутрішній	кількісна
Рівень кібербезпеки	зовнішній/внутрішній	кількісна/ якісна
Надійність ІТ-систем	внутрішній	кількісна
Доступність інформації	внутрішній	якісна
Інтегрованість інформаційних систем	внутрішній	якісна

Екологічні		
Рівень викидів	зовнішній	кількісна
Обсяг радіоактивних відходів	внутрішній	кількісна
Ефективність поводження з відходами	внутрішній	кількісна/ якісна
Вплив на довкілля	зовнішній	якісна
Використання ресурсів	внутрішній	кількісна
Відповідність екологічним нормам	зовнішній	якісна
Рівень екологічного моніторингу	внутрішній	кількісна

Побудована система показників не є жорстко фіксованою і може бути розширена або модифікована залежно від цілей дослідження, доступності даних та специфіки конкретного енергоблоку чи енергетичного об'єкта. Зокрема, до неї можуть бути додані показники, що характеризують, наприклад, інноваційний розвиток, рівень автоматизації або стійкість до екстремальних впливів. Водночас у процесі формування системи показників доцільно уникати дублювання або надлишковості, тобто при аналізі частина показників може бути виключена або агрегована у разі, якщо вони є складовими інших або мають високий рівень кореляції. Наприклад, показник «загальна ефективність експлуатації» може включати складові, такі як коефіцієнт використання потужності та витрати на обслуговування, а «рівень цифровізації» частково відображає характеристики інформаційної інтеграції та швидкості обробки даних. Такий загальний якісний показник, як «культура безпеки» може узагальнювати показники дотримання норм, рівня підготовки персоналу та організаційної дисципліни, що також можна відкинути для усунення зайвого дублювання. Таким чином, запропонована система показників є гнучкою, масштабованою та здатною до адаптації, що дозволяє забезпечити адекватне відображення складної структури факторів, які визначають якість функціонування енергоблоку АЕС, а також створює основу для подальшого аналізу їх взаємозв'язків і впливу на ризики.

Наступним етапом після ідентифікації системи показників та їх аналізу з метою повного врахування можливих аспектів функціонування енергоблоку, а також виключення дублюючих або надлишкових характеристик, є визначення вагомості кожного показника в загальній системі оцінювання. Враховуючи багатопараметричний характер досліджуваного

об'єкта, різномірність показників (кількісних і якісних), а також складність формалізації окремих із них, доцільним є застосування експертного методу визначення вагових коефіцієнтів. Особливістю запропонованого підходу є формування окремих експертних груп за кожним напрямом оцінювання, що відповідає структурі системи показників (табл. 1). Така організація забезпечує більш глибоке та обгрунтоване оцінювання, оскільки кожна група експертів працює в межах власної професійної компетенції, враховуючи специфіку технічних, економічних, соціальних, організаційних, етичних, інформаційних та екологічних аспектів. У межах кожної групи здійснюється оцінювання вагомості всіх відповідних показників із урахуванням їх впливу на якість функціонування та рівень ризику. Такий підхід дозволяє врахувати досвід, знання та професійні судження фахівців у галузі експлуатації, безпеки та управління енергоблоками АЕС. При формуванні експертної групи доцільно включати фахівців різних напрямів: технічного обслуговування та експлуатації; ядерної та радіаційної безпеки; економіки енергетики; управління персоналом; інформаційних технологій та кібербезпеки. Це забезпечує міждисциплінарний характер оцінювання та дозволяє більш повно врахувати специфіку кожної групи показників.

Кожному експерту пропонується оцінити вагомість кожного показника i у межах інтервалу $[0;1]$, з урахуванням його впливу на якість функціонування та рівень ризику. Агрегування індивідуальних експертних оцінок здійснюється із застосуванням робастних статистичних характеристик. Для кожного показника i формується сукупність оцінок w_{ij} , отриманих від експертів відповідної групи, де $j = 1, 2, \dots, m$, а m - кількість експертів. З метою зменшення впливу крайніх

(аномальних) оцінок та підвищення стійкості результатів до суб'єктивних відхилень, агрегування експертних оцінок здійснюється за допомогою медіанного значення:

$$w_i^{med} = median(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}), \quad (1)$$

де w_{ij} - оцінка вагомості i -го показника, надана j -м екпертом, m — кількість експертів у відповідній групі: економічні, технічні, екологічні, тощо (табл. 1).

Для кожного показника якості, що визначають функціонування енергоблоку,

визначають середнє значення $\bar{w}_{iav} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i$, де m – кількість експертів (кількість експертних оцінок), та складають кодовану матрицю, яка візуально представлена у вигляді таблиці 2. Показники кодують знаком "+", якщо результат вимірювання показника якості вищий за середній, та знаком "-", якщо результат вимірювання показника якості нижчий за середній. Згідно з даними кодованої матриці будують діаграму розсіювання (рис.1). На діаграмі розсіювання на осі абсцис зазначають номер показника якості, а на осі ординат – відповідне кодоване значення експертних оцінок.

Таблиця 2

Візуальне представлення кодованої матриці показників оцінювання якості та результатів розрахунку коефіцієнтів вагомості

Table 2

Visual representation of the coded matrix of quality assessment indicators and the results of calculating weighting coefficients

Експерт	Показник оцінювання якості					Показник	Позначення	Показник оцінювання якості					
	1	2	3	4	i			1	2	3	4	i	
1	Медіана "+"	$M_i^{ "+" }$						
2	Медіана "-"	$M_i^{ "-" }$						
3	Різниця медіан	Δ_i						
...	Коефіцієнт вагомості	w_i						
m						Значущий коефіцієнт вагомості	\hat{w}_i						

Для показників якості визначають медіани M_i^+, M_i^- : $M_i^{+/-} = \sum_{i=1}^m R_i$, де m – кількість показників більше «+» / менше «-» середнього відповідно для обрахування M_i^+, M_i^- : Далі знаходять різницю медіан за формулою: $\Delta_i = |M_i^+ - M_i^-|$. Визначають коефіцієнти вагомості w_i для кожного з показників оцінювання якості:

$$w_i = \frac{\Delta_i}{\sum_{i=1}^m \Delta_i}. \quad (2)$$

При цьому, показники оцінювання якості, для яких є правильною нерівність $w_i > \frac{1}{m}$, вважаються визначальними. Уточнення коефіцієнтів вагомості здійснюють згідно з формулою:

$$w_i^i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{m_0} w_i}, \quad (3)$$

де m_0 – кількість визначальних показників якості.

Застосування медіани є обґрунтованим у випадках, коли: можливі значні розбіжності в оцінках експертів, присутні суб'єктивні або нечіткі критерії, необхідно забезпечити робастність результатів.

З метою більш повного відображення розподілу експертних суджень додатково визначається мода як значення, що найчастіше зустрічається в сукупності оцінок:

$$w_i^{mod} = mode(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}). \quad (4)$$

Поєднання медіани та моди дозволяє не лише отримати стійку оцінку центральної тенденції, але й врахувати найбільш типовий рівень значущості показника, що є особливо важливим у випадку наявності кластеризації експертних думок, та забезпечує більш глибоке розуміння структури оцінок і підвищує інформативність результатів. При цьому значення моди може використовуватися як додатковий індикатор для аналізу стабільності оцінок і виявлення можливих розбіжностей між експертами. З метою оцінювання узгодженості експертних суджень доцільно застосовувати статистичні показники, зокрема коефіцієнт конкордації, який дозволяє визначити ступінь погодженості ранжування показників. У разі виявлення низького рівня узгодженості може бути проведено повторне експертне оцінювання або уточнення формулювання

показників. Практична реалізація обчислень, пов'язаних із визначенням медіани, моди, нормуванням вагових коефіцієнтів та оцінюванням узгодженості експертних оцінок, може бути здійснена із використанням спеціалізованих програмних засобів статистичного аналізу, зокрема пакету Statistica [23], що забезпечує автоматизацію розрахунків, підвищення точності результатів та можливість їх подальшої візуалізації.

Запропонований підхід до визначення вагових коефіцієнтів дозволяє врахувати міждисциплінарний характер системи показників, зменшити вплив суб'єктивних факторів та забезпечити адаптивність моделі до змін умов функціонування енергоблоку. Це створює необхідне підґрунтя для подальшого аналізу взаємозв'язків між показниками та оцінювання ризиків на основі сформованої системи ваг.

Моделювання взаємозв'язків між показниками на основі графового підходу

З урахуванням того, що функціонування енергоблоку АЕС визначається не лише сукупністю окремих показників, а й характером їх взаємодії, важливим етапом дослідження є моделювання взаємозв'язків між ними. У реальних умовах експлуатації вплив окремих факторів не є ізольованим: зміна одного показника може спричинити каскадні ефекти, що проявляються через інші параметри системи, формуючи складну мережу залежностей. Для формалізації таких взаємозв'язків доцільно застосувати графовий підхід, який дозволяє відобразити структуру впливів між показниками та врахувати їх синергетичний характер.

Система показників представляється у вигляді орієнтованого графа:

$$G = (V, E), \quad (5)$$

де V - множина вершин, що відповідають показникам, E - множина орієнтованих ребер, які відображають вплив одного показника на інший.

Наявність ребра між вершинами i та j означає, що показник x_i впливає на показник x_j , причому цей вплив може бути як прямим, так і опосередкованим через інші елементи системи. Сила впливу визначається ваговим коефіцієнтом зв'язку.

Графова модель формалізується у вигляді матриці суміжності:

$$A = [a_{ij}], \quad (6)$$

де $a_{ij} \in [0; 1]$ - коефіцієнт впливу показника i на показник j .

Значення $a_{ij} = 0$ означає відсутність впливу, тоді як значення, близькі до 1, характеризують сильний вплив. Формування матриці A може здійснюватися на основі експертних оцінок або аналізу статистичних даних. Особливістю такої моделі є можливість врахування не лише прямих, але й непрямих (ланцюгових) впливів, що є принципово важливим для складних технічних систем, таких як енергоблоки АЕС. Разом з тим, у системах типу енергоблоку АЕС часто спостерігаються синергетичні ефекти, коли сукупний вплив декількох факторів перевищує просту суму їх індивідуальних впливів. Наприклад, одночасне зниження кваліфікації персоналу та погіршення стану обладнання може призвести до значно вищого рівня ризику, ніж кожен фактор окремо.

Для врахування таких ефектів використовується узагальнене представлення впливів:

$$X^{corr} = (I - A)^{-1}X, \quad (7)$$

де X - вектор вихідних значень показників, I - одинична матриця, A - матриця взаємозв'язків.

Отриманий вектор X^{corr} відображає скориговані значення показників з урахуванням як прямих, так і непрямих впливів між ними.

Запропонований підхід дозволяє виявити ключові показники, які мають найбільший вплив на інші, визначити вузлові елементи системи, що формують основні ризики, оцінити ступінь взаємозалежності між різними групами факторів та врахувати ефекти поширення впливів у системі. Зокрема, показники з високими значеннями сумарного вихідного впливу можуть розглядатися як критичні точки управління, оскільки їх зміна здатна суттєво впливати на загальний стан системи. При цьому практична реалізація графової моделі передбачає формування матриці взаємозв'язків на основі експертних оцінок, можливість використання шкали (наприклад:

слабкий, середній, сильний вплив) з подальшою кількісною інтерпретацією та дає можливість періодичного оновлення структури графа у разі зміни умов функціонування. Важливою перевагою такого підходу є його гнучкість і адаптивність: структура взаємозв'язків може змінюватися залежно від режиму роботи енергоблоку, рівня навантаження, технічного стану та зовнішніх умов. Таким чином, використання графового підходу дозволяє перейти від ізольованого аналізу показників до системного розгляду їх взаємодії, що є принципово важливим для об'єктів підвищеної небезпеки, до яких належать енергоблоки АЕС. Отримані результати створюють основу для подальшого оцінювання ризиків з урахуванням складної структури взаємозв'язків між факторами.

Оцінювання ризиків функціонування енергоблоку АЕС з урахуванням системи показників та їх взаємозв'язків

Оцінювання ризиків функціонування енергоблоку АЕС у межах запропонованого підходу базується на інтеграції трьох взаємопов'язаних складових: системи показників, їх вагових коефіцієнтів та структури взаємозв'язків між ними. Такий підхід дозволяє перейти від спрощеного аналізу окремих факторів до комплексного урахування багатопараметричності системи, її внутрішньої динаміки та потенційних синергетичних ефектів. Як правило, ризик розглядається як функція окремих не залежних змінних, а у даному випадку формується як результат взаємодії показників, що можуть підсилювати або послаблювати вплив один одного, що особливо важливо для об'єктів підвищеної небезпеки, де навіть незначні відхилення у декількох підсистемах можуть призводити до суттєвого зростання загального рівня ризику.

Формально ризик функціонування енергоблоку пропонується визначати як функцію від скоригованих значень показників з урахуванням їх взаємозв'язків:

$$R = f(\tilde{X}), \quad (8)$$

де $\tilde{X} = X^{corr}$ - вектор показників, скоригований на основі графової моделі взаємодій.

З урахуванням вагових коефіцієнтів, отриманих на попередньому етапі, оцінка

ризиків може бути представлена у вигляді зваженої суми:

$$R = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \cdot r_i, \quad (9)$$

де \tilde{w}_i - нормований ваговий коефіцієнт i -го показника, r_i - частковий ризик, пов'язаний із відповідним показником.

Частковий ризик r_i визначається на основі відхилення фактичного значення показника від його нормативного або цільового рівня:

$$r_i = \frac{|x_i - x_i^{ref}|}{x_i^{ref}}, \quad (10)$$

де x_i - фактичне значення показника, x_i^{ref} - еталонне (нормативне) значення.

При цьому часткові ризики формуються не лише на основі окремих показників, але й з урахуванням їх взаємного впливу. Скориговані значення \tilde{X} , отримані за допомогою графової моделі, дозволяють врахувати ефекти поширення відхилень у системі. Таким чином, навіть якщо окремий показник має незначне відхилення, його вплив на інші елементи системи може призводити до суттєвого зростання загального ризику.

Для якісних показників використовується шкала вербальних оцінок (наприклад, «низький», «середній», «високий ризик») з подальшою їх кількісною інтерпретацією. А отримане значення ризику може бути інтерпретоване за рівнями, що характеризують стан функціонування енергоблоку, наприклад: допустимий рівень; підвищений рівень; критичний рівень. Межі цих рівнів можуть встановлюватися на основі нормативних вимог, статистичних даних або експертних оцінок. Важливою перевагою такого підходу є можливість деталізації результатів, тобто визначення внеску окремих груп показників у загальний ризик, ідентифікувати найбільш критичні фактори, визначити пріоритетні

напрями управління, та обґрунтувати заходи щодо зниження ризиків, що стануть частиною стратегії управління енергоблоком та АЕС в цілому. Зміна значень показників, їх ваг або структури взаємозв'язків призводить до автоматичного оновлення оцінки ризику, що забезпечує актуальність результатів у динамічних умовах експлуатації

Таким чином, запропонований підхід до оцінювання ризиків дозволяє врахувати складну природу функціонування енергоблоку АЕС, забезпечує інтеграцію кількісних і якісних характеристик, а також дозволяє відобразити синергетичний вплив факторів, що формують загальний рівень безпеки та надійності системи.

Результати досліджень

Для демонстрації практичного застосування запропонованої методики розглянемо приклад оцінювання ризику функціонування енергоблоку АЕС на основі обмеженої множини показників із різних

груп. Так, для аналізу було обрано 5 показників оцінювання якості (табл. 3) та розраховано часткові показники за формулою (10).

Таблиця 3
Показники оцінювання якості
Table 3
Quality assessment indicators

№	Показник	Група	x_i	x_i^{ref}	\bar{w}_i	r_i
1	Коефіцієнт готовності	технічна	0,92	0,98	0,25	0,92 - 0,98
2	Частота відмов	технічна	0,08	0,03	0,20	0,08 - 0,03
3	Собівартість енергії	економічна	1,15	1,00	0,15	1,15 - 1,00
4	Культура безпеки	соціальна	0,70	0,90	0,20	0,70 - 0,90
5	Рівень кібербезпеки	інформаційна	0,75	0,95	0,20	0,75 - 0,95

Нехай матриця взаємозв'язків має вигляд (фрагмент):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,2 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,1 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0,2 & 0,2 & 0,1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0,2 & 0 \end{bmatrix}$$

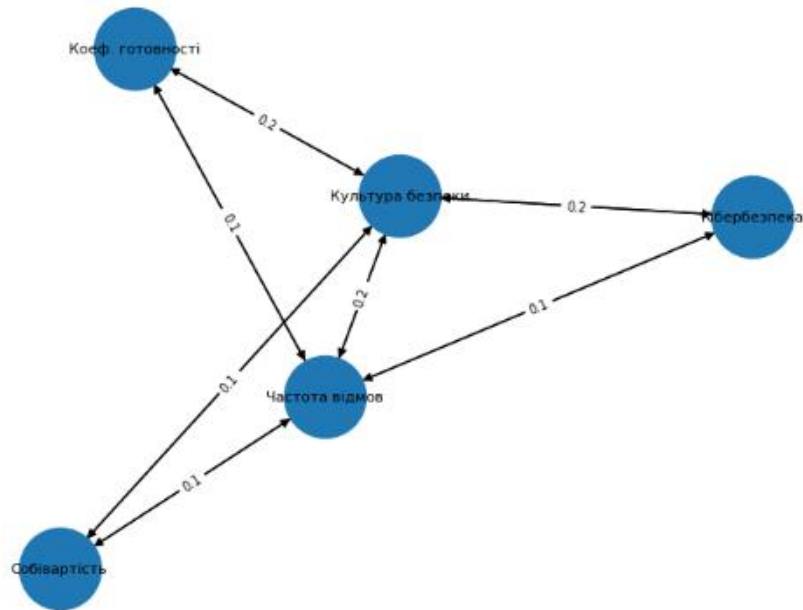


Рис. 1 – Візуальне представлення графу і зв’язків між показниками оцінювання якості функціонування енергоблоку

Fig. 1 – Visual representation of the graph and relationships between indicators for assessing the quality of operation of a power unit

Побудований граф відображає структуру взаємозв’язків між обраними показниками та дозволяє візуалізувати характер і інтенсивність їх взаємного впливу в межах оцінювання ризику функціонування енергоблоку. Кожна вершина графа відповідає окремому показнику, що характеризує певний аспект функціонування системи, тоді як орієнтовані ребра між вершинами відображають напрям впливу одного показника на інший. Таким чином, стрілка від одного вузла до іншого означає, що зміна першого показника призводить до зміни другого, формуючи причинно-наслідковий зв’язок у системі. Кількісна інтерпретація сили такого впливу задається ваговими коефіцієнтами, які підписані на відповідних ребрах графа. Чим більше значення коефіцієнта, тим суттєвішим є вплив одного показника на інший, що дозволяє не лише фіксувати сам факт взаємозалежності, але й оцінювати її інтенсивність. У результаті формується зважена мережа взаємодій, у якій окремі зв’язки можуть відігравати визначальну роль у формуванні загального рівня ризику. Аналіз структури графа свідчить про нерівномірність розподілу впливів між показниками. Деякі з них виконують переважно роль “джерел” впливу, інші – “приймачів”, тоді як окремі вузли поєднують обидві функції, виступаючи ключовими елементами системи. Зокрема, показник, що характеризує частоту відмов,

займає центральне положення в структурі графа, оскільки має значну кількість як вихідних, так і вхідних зв’язків. Це означає, що він не лише безпосередньо впливає на інші параметри системи, але й сам є чутливим до змін у них. Така позиція вказує на його критичну роль у формуванні загального рівня ризику.

Важливою особливістю графа є наявність замкнених контурів впливу, які відображають потенційні циклічні залежності між показниками. У таких випадках зміна одного параметра може опосередковано повертатися до нього через ланцюг інших впливів, підсилюючи або послаблюючи початковий ефект. Це створює передумови для виникнення синергетичних ефектів, коли сукупний вплив декількох факторів перевищує їх індивідуальний внесок. Таким чином, графова модель дозволяє перейти від лінійного уявлення про систему до мережевої інтерпретації її функціонування, у якій ризик формується як результат складної взаємодії показників. Візуалізація таких зв’язків не лише підвищує наочність аналізу, але й створює основу для ідентифікації критичних вузлів системи, вплив на які може забезпечити найбільш ефективне зниження загального рівня ризику.

Після врахування взаємозв’язків (наближено) за формулою $r_i^{corr} \approx r_i + a_{ij}r_j$ отримуємо наступні значення:

№	Показник	r_i^{corr}
1	Коефіцієнт готовності	$0,061 + (0,2 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,222) \approx 0,428$
2	Частота відмов	$1,667 + (0,1 \cdot 0,061 + 0,2 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 0,222 + 0,1 \cdot 0,211) \approx 1,806$
3	Собівартість енергії	$0,15 + (0,1 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,222) \approx 0,339$
4	Культура безпеки	$0,222 + (0,2 \cdot 0,061 + 0,2 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 0,211) \approx 0,655$
5	Рівень кібербезпеки	$0,211 + (0,1 \cdot 1,667 + 0,2 \cdot 0,222) \approx 0,455$

Наступним етапом розраховуємо інтегральний ризик: $R = \sum \tilde{w}_i \cdot r_i^{corr}$
 $R = 0,25 \cdot 0,428 + 0,20 \cdot 1,806 + 0,15 \cdot 0,339 + 0,20 \cdot 0,655 + 0,20 \cdot 0,455$
 $R \approx 0,107 + 0,361 + 0,051 + 0,131 + 0,091 = 0,741$

Отримане значення: $R = 0,741$ свідчить про підвищений рівень ризику, близький до критичного.

Аналіз внеску показує, що найбільший вплив має: частота відмов (через високе відхилення), а також її сильний вплив на інші показники (синергетичний ефект).

Наведений приклад демонструє, що навіть при відносно помірних відхиленнях більшості показників загальний рівень ризику може суттєво зростати внаслідок їх взаємодії. Це підтверджує доцільність використання графової моделі та врахування синергетичних ефектів при оцінюванні функціонування енергоблоку АЕС.

Висновки

У роботі розроблено методичний підхід до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС на основі ризик-орієнтованої концепції, який враховує складність, багатопараметричність та потенційну небезпечність об'єкта дослідження. Запропонована методика базується на поєднанні кількісних і якісних показників, що формують цілісне уявлення про стан системи з урахуванням впливу як внутрішніх, так і зовнішніх факторів. Для реалізації зазначеного підходу було сформовано адаптивну систему показників, структуровану за основними групами факторів, яка може бути модифікована залежно від умов функціонування енергоблоку, змін у нормативному середовищі, технічному стані обладнання або рівні зовнішніх загроз. Такий підхід дозволяє забезпечити гнучкість моделі та її придатність до використання в динамічних умовах експлуатації.

Запропоновано процедуру визначення вагових коефіцієнтів на основі експертного оцінювання з використанням медіани як стійкої статистичної характеристики та моди як індикатора найбільш типових значень, що підвищує обґрунтованість результатів та дозволяє врахувати особливості розподілу експертних суджень. Організація експертного оцінювання за

групами факторів сприяє більш глибокому врахуванню специфіки кожного напрямку оцінювання.

Наступним етапом оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС було моделювання взаємозв'язків між показниками на основі графового представлення, що дозволяє врахувати не лише прямі, але й непрямі впливи, а також синергетичні ефекти, які виникають у складних технічних системах. Це забезпечує перехід від ізолюваного аналізу показників до системного розгляду процесів функціонування енергоблоку.

Таким чином, у межах запропонованої методики розроблено підхід до оцінювання ризиків, який інтегрує скориговані значення показників, їх вагомість та структуру взаємозв'язків, що дозволяє більш адекватно відобразити реальний рівень безпеки. Наведений приклад розрахунку підтверджує, що врахування взаємодії факторів суттєво впливає на результати оцінювання та дозволяє виявити критичні елементи системи. Отримані результати мають практичне значення для підвищення ефективності управління безпекою та надійністю функціонування енергоблоків АЕС, оскільки дозволяють ідентифікувати пріоритетні напрями впливу,

обґрунтовувати управлінські рішення та здійснювати моніторинг стану системи в умовах невизначеності. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, спрямованих на

вдосконалення методів оцінювання ризиків, зокрема шляхом розширення системи показників, поглиблення аналізу взаємозв'язків та застосування методів сценарного моделювання.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один з авторів статті є заступником головного редактора цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Автори використовували ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) виключно для редагування мови та корекції граматики. Весь науковий контент, матеріали та висновки були створені авторами. Остаточний текст був переглянутий та перевірений авторами.

Список використаних джерел:

1. Оцінка ризику техногенних аварій насосів АЕС та їхніх екологічних наслідків / О. С. Шевченко, Л. Л. Гурець, М. М. Ковальчук, С. С. Шевченко. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2025. № 2(106). С. 57–65. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).06)
2. Shevchenko S. S. Mathematical modeling of centrifugal machines rotors seals for the purpose of assessing their influence on dynamic characteristics. *Mathematical Modeling and Computing*. 2021. Vol. 8, No. 3. P. 422–431. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.422>
3. Удосконалення методу відновлення синтетичної вогнестійкої турбінної оливи для обладнання АЕС / С. В. Зайцев, П. М. Кузнецов, В. П. Кравченко, М. П. Мазник, А. М. Маргаза, В. П. Кишневський. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2025. № 1(105). С. 55–61. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).06)
4. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / В. П. Кравченко, А. П. Власов, А. М. Головченко, А. С. Мазуренко, В. О. Дубковський, О. О. Чулкін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2023. № 2(98). С. 53–60. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05)
5. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems / Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Y., Piontkovskiy O.. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42–45. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).07)
6. Kamali Saraji M., Streimikiene D. A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach. *Sustainable Environment Research*. 2024. Vol. 34. Art. 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00211-3>
7. Assessing key indicators of efficient green energy production for IEA members / Kasradze M., Kamali Saraji M., Streimikiene D. et al.. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 55513–55528. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26285-x>
8. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. 2nd ed. Geneva: ISO, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/31000>
9. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. Geneva: ISO, 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/62085.html>
10. Ioannou A., Angus A., Brennan F. Risk-based methods for sustainable energy system planning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 602–615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.082>
11. Arnold U., Yildiz Ö. Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures – a Monte Carlo simulation approach. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 77. P. 227–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.059>
12. Rocchetta R., Li Y. F., Zio E. Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 136. P. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.013>

13. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств / Г. С. Грінченко, О. В. Кіпоренко, С. С. Негодів, А. Я. Лисенко, К. К. Мазорчук, Р. С. Нос. *Машинобудування*. 2024. № 34. С. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02>
14. Лисенко А. Я., Нос Р. С., Мазорчук К. І., Негодів С. С. Удосконалення кваліметричних підходів до оцінювання ризиків енергопідприємств з урахуванням аспектів кібербезпеки. *Машинобудування*. 2025. № 36. С. 102–118. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10>
15. Peček B., Kovačič A. Methodology of monitoring key risk indicators. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2019. Vol. 32, No. 1. P. 3485–3501. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529>
16. Prospective assessment of energy technologies: a comprehensive approach for sustainability assessment / Haase M., Wulf C., Baumann M. et al. *Energy, Sustainability and Society*. 2022. Vol. 12. Art. 20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
17. Environmental assessment of emerging technologies: recommendations for prospective LCA / Arvidsson R., Tillman A.-M., Sandén B. A. et al. *Journal of Industrial Ecology*. 2018. Vol. 22. P. 1286–1294. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
18. MCDA for the sustainability assessment of energy technologies and systems: identifying challenges and opportunities / Wulf C., Mesa Estrada L. S., Haase M. et al. *Energy, Sustainability and Society*. 2025. Vol. 15. Art. 45. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00546-8>
19. Proper and improper uses of MCDA methods in energy systems analysis / Cinelli M., Burgherr P., Kadziński M., Słowiński R. *Decision Support Systems*. 2022. Vol. 163. Art. 113848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113848>
20. Lindfors A. Assessing sustainability with multi-criteria methods: a methodologically focused literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2021. Vol. 12. Art. 100149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100149>
21. A risk assessment method of the energy supply chain based on combination weights and technique for order preference by similarity to an ideal solution / Liang H., Jiang X., Yang Y. et al. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9 (Suppl. 7). P. 1647–1656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.227>
22. Martišauskas L., Augutis J., Krikštolaitis R. Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions. *Energy Strategy Reviews*. 2018. Vol. 22. P. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
23. Парфенцева Н. О., Голубова Г. В. Статистичні методи контролю якості як інструмент дослідження даних у пакеті Statistica. *Статистика України*. 2023. № 1. С. 19–26. DOI: [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)

Отримано: 08.04.2026 / Переглянуто: 11.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹ **HRINCHENKO H. S.**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

¹ **LYSENKO A. YA.**,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail: dagost@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3916-8029>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University*

Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

QUALIMETRIC ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE QUALITY OF A NUCLEAR POWER PLANT UNIT BASED ON A RISK-ORIENTED APPROACH

The article is devoted to the relevant scientific and practical problem of developing and substantiating a methodological approach to the comprehensive assessment of the performance quality of nuclear power plant (NPP) units. In the context of increasing nuclear safety requirements and the need to extend the service life of power equipment, traditional methods based on isolated technical and economic indicators prove insufficient for an adequate representation of the state of complex technical systems. The authors propose an integration of qualimetric analysis methods with the principles of a risk-oriented approach, which allows not only for recording the current parameters of the system but also for considering potential threats and the synergistic effects of their interaction. The study provides a critical analysis of scientific approaches to ensuring NPP operational safety in Ukraine and global experience in applying multi-criteria decision analysis (MCDA) in the energy sector. It was identified that the key issue is the lack of a unified methodology that combines quantitative technical parameters with qualitative characteristics, such as safety culture or organizational efficiency. Based on a systems approach, a multi-level system of 49 indicators has been formed, structured into seven categories: technical, economic, social, organizational, ethical, informational, and environmental. A distinctive feature of the system is its adaptability to internal (modernization, personnel) and external (cyber threats, regulatory changes) factors. The methodological part of the research describes the process of determining the weights of indicators using expert groups and statistical methods. To increase the objectivity of the assessments, the use of median values and mode is proposed, which allows for neutralizing the influence of anomalous expert opinions. A significant scientific result is the application of a graph-based approach for modeling the interrelationships between indicators. The constructed directed graph model and adjacency matrix allow for the identification of "node" parameters, the change of which causes a cascading impact on the safety of the entire power unit. The interpretation of the modeling results indicates that the performance quality of an NPP is a functional dependence on the current state and the aggregate of associated risks. The proposed approach provides a scientific basis for making informed management decisions regarding equipment modernization and operational resource management, taking into account the non-linear nature of factor interaction in high-hazard systems.

Keywords: nuclear power plant, power unit, qualimetric assessment, risk-oriented approach, integral quality indicator, operational safety, graph model.

In cites: Hrinchenko H. S., Lysenko A. Ya. (2026). Qualimetric assessment of the performance quality of a nuclear power plant unit based on a risk-oriented approach. *Engineering*, (37), 6-23. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01> (in Ukraine)

Conflict of interest

Authors certify that, although one of the authors of the article serves as a deputy editor-in-chief of this journal, the peer review process, the decision regarding publication, and the editing were conducted independently, without his involvement or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

The authors used ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) exclusively for language editing and grammar correction. All scientific content, materials, and conclusions were created by the authors. The final text was reviewed and checked by the authors.

References:

1. Shevchenko, OS, Hurets, LL, Kovalchuk, MM & Shevchenko, SS 2025, 'Otsinka ryzyku tekhnohennykh avarii nasosiv AES ta yikhnikh ekolohichnykh naslidkiv' [Risk assessment of man-made accidents at nuclear power plant noses and other environmental consequences], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no 2(106), pp. 57–65. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).06) (in Ukraine)
2. Shevchenko, SS 2021, 'Mathematical modeling of centrifugal machines rotors seals for the purpose of assessing their influence on dynamic characteristics', *Mathematical Modeling and Computing*, no 8(3), pp. 422–431. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.422>
3. Zaitsev, SV, Kuznietsov, PM, Kravchenko, VP, Maznyk, MP, Marhaza, AM & Kyshnevskiy, VP 2025, 'Udoskonalennia metodu vidnovlennia syntetychnoi vohnestiikoi turbinni olyvy dlia obladnannia AES' [Improvement of the method for recovering synthetic fire-resistant turbine oil for Nuclear power plant equipment.], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no 1(105), pp. 55–61. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).06) (in Ukraine)
4. Kravchenko, VP, Vlasov, AP, Holovchenko, AM, Mazurenko, AS, Dubkovskiy, VO & Chulkin, OO 2023, 'Stan ta perspektyvy vyprobuvan systemy hermetychnoho ohorodzhennia reaktornoї ustanovky z VVER-1000 na hermetychnist' [Status and prospects of testing the hermetic protection system of the VVER-1000 reactor plant for tightness.], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 2(98), pp. 53–60. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05) (in Ukraine)
5. Skalozubov, V, Kozlov, I, Chulkin, O, Komarov, Y & Piontkovskiy, O 2019, 'Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems', *Nuclear and Radiation Safety*, iss 1(81), pp. 42–45. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).07)
6. Kamali Saraji, M & Streimikiene, D 2024, 'A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach', *Sustainable Environment Research*, iss 34, p. 6. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00211-3>
7. Kasradze, M, Kamali Saraji, M, Streimikiene, D et al. 2023, 'Assessing key indicators of efficient green energy production for IEA members', *Environmental Science and Pollution Research*, iss 30, pp. 55513–55528. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26285-x>
8. International Organization for Standardization 2018, *ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines*. 2nd edn. Geneva, viewed <<https://www.iso.org/standard/31000>>
9. International Organization for Standardization 2015, *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. Geneva, viewed <<https://www.iso.org/standard/62085.html>>
10. Ioannou, A, Angus, A & Brennan, F 2017, 'Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, iss 74, pp. 602–615. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.082>
11. Arnold, U & Yildiz, Ö 2015, 'Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures – A Monte Carlo simulation approach', *Renewable Energy*, iss 77, pp. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.059>
12. Rocchetta, R, Li, YF & Zio, E 2015, 'Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions', *Reliability Engineering & System Safety*, iss 136, pp. 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.013>
13. Hrinchenko, HS, Kiporenko, OV, Nehodov, SS, Lysenko, AYa, Mazorchuk, KK & Nos, RS 2024, 'Rozvytok normatyvnoho pidkhodu do otsiniuvannia ryzykiv enerhopidpriemstv' [Development of a regulatory approach to assessing the risks of energy enterprises.], *Engineering*, iss 34, pp. 17–30. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02> (in Ukraine)
14. Lysenko, AYa, Nos, RS, Mazorchuk, KI & Nehodov, SS 2025, 'Udoskonalennia kvalimetrychnykh pidkhodiv do otsiniuvannia ryzykiv enerhopidpriemstv z urakhuvanniam aspektiv kiberbezpeky' [Improving qualimetric approaches to assessing the risks of energy enterprises, taking into account cybersecurity aspects.], *Engineering*, iss 36, pp. 102–118. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10> (in Ukraine)
15. Peček, B & Kovačič, A 2019, 'Methodology of monitoring key risk indicators' [Methodology for monitoring key risk indicators], *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, iss 32(1), pp. 3485–3501. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529> (in Ukraine)

16. Haase, M, Wulf, C, Baumann, M et al 2022, 'Prospective assessment of energy technologies: A comprehensive approach for sustainability assessment', *Energy, Sustainability and Society*, no 12, p. 20. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
17. Arvidsson, R, Tillman, AM, Sandén, BA et al 2018, 'Environmental assessment of emerging technologies: Recommendations for prospective LCA', *Journal of Industrial Ecology*, iss 22, pp. 1286–1294. <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
18. Wulf, C, Mesa Estrada, LS, Haase, M et al 2025, 'MCDA for the sustainability assessment of energy technologies and systems: Identifying challenges and opportunities', *Energy, Sustainability and Society*, iss 15, p. 45. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00546-8>
19. Cinelli, M, Burgherr, P, Kadziński, M & Słowiński, R 2022, 'Proper and improper uses of MCDA methods in energy systems analysis', *Decision Support Systems*, iss 163, 113848. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113848>
20. Lindfors, A 2021, 'Assessing sustainability with multi-criteria methods: A methodologically focused literature review', *Environmental and Sustainability Indicators*, no 12, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100149>
21. Liang, H, Jiang, X, Yang, Y et al 2023, 'A risk assessment method of the energy supply chain based on combination weights and technique for order preference by similarity to an ideal solution', *Energy Reports*, no 9(Suppl. 7), pp. 1647–1656. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.227>
22. Martišauskas, L, Augutis, J & Krikštolaitis, R 2018, 'Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions', *Energy Strategy Reviews*, iss 22, pp. 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
23. Parfentseva, NO & Holubova, HV 2023, 'Statystychni metody kontroliu yakosti yak instrument doslidzhennia danykh u paketi Statistica', *Statystyka Ukrainy*, iss 1, pp. 19–26. [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)

Submission received 04.08.2026/Revised: 05.11.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026