

УДК 621.311

Анатолій Замулко*, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-8018-6332>

Віталій Степаненко, <https://orcid.org/0000-0001-6176-589X>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, Київ, 03056, Україна

*Автор-кореспондент: zamuлко.anatolii@lil.kpi.ua

ЕКСПЕРТНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКІВ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Анотація. У статті досліджено використання експертних методів оцінювання в задачах визначення ризиків інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Актуальність роботи полягає в тому, що приєднання до розподільних мереж ВДЕ зі стохастичними характеристиками їх функціонування суттєво впливає на режими роботи електричної мережі. Внаслідок цього параметри електричної енергії, яка постачається споживачам, не відповідає встановленим стандартам параметрам. Метою статті є вивчення можливостей використання експертних оцінок в задачах визначення ризиків інтеграції ВДЕ для прогнозування можливих негативних наслідків впливу об'єктів ВДЕ на режими розподільної мережі. Методологія дослідження базується на використанні знань та досвіду експертів для вирішення складних або недостатньо формалізованих проблем, коли об'єктивні дані відсутні або їх недостатньо. В результаті вивчення методів аналізу ризиків складних систем з'ясовано, що застосування методу експертних оцінок дає змогу зосередитися на ключових параметрах, що визначають загальну стабільність та ефективність роботи системи в умовах високої невизначеності. Для досягнення поставлених завдань в роботі сформовано експертну групу, розроблено процедуру та анкету для проведення експертної оцінки, здійснено обробку результатів опитування та аналіз отриманих даних. Аналіз узгодженості експертних оцінок вказує на помірний рівень відхилення та прийнятний рівень розбіжностей у думках учасників групи. Використання методу експертних оцінок дало змогу отримати структуровану оцінку ризиків та значущості різних факторів. Для забезпечення комплексного підходу до оцінки ризиків інтеграції ВДЕ доцільно сформувати багатокритеріальний показник, який враховуватиме різноплановість факторів на основі експертних оцінок.

Ключові слова: експертні методи оцінювання, оцінка ризиків, відновлювані джерела енергії, прийняття рішень.

1. Вступ

Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні спрямований на забезпечення дотримання міжнародних стандартів, принципів та практик Європейського Союзу [1], а запланований рівень виробництва електричної енергії з ВДЕ задовольнятиме потреби суспільства та національної економіки в паливно-енергетичних ресурсах у економічно ефективний, технічно надійний, екологічний та безпечний спосіб, гарантуватиме енергетичну безпеку як в мирний час, так і в умовах надзвичайних ситуацій.

Проте збільшення проникнення ВДЕ з їх стохастичними характеристиками створює нові ризики для нормального функціонування розподільних електричних мереж, що не були розраховані на такий тип джерел [2]. Внаслідок генерації з ВДЕ виникає невідповідність фізичних параметрів поставленої споживачам електричної енергії встановленим стандартам [3–5]. Для забезпечення надійної роботи мереж одним з ключових напрямів є створення багатофакторної оцінки ризиків, яка дозволить

прогнозувати можливі негативні наслідки об'єктів ВДЕ на режими розподільної мережі та створить передумови для їхньої мінімізації.

Для аналізу якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення використовується велика кількість параметрів [6, 7]. Однак врахувати всі ці параметри одночасно зазвичай є непрактичним, оскільки це може ускладнити процес аналізу, зробити його занадто громіздким або потребувати значних обчислювальних ресурсів. Тому для дослідження використано фактори, на які найбільше звертають увагу науковці. Але навіть невелика кількість факторів потребує порівняння та оцінки їх ролі. Тому виникає необхідність вибору методу для аналізу найбільш значущих показників, які мають найбільший вплив на якість електроенергії в конкретній системі.

Для аналізу ризиків складних систем можуть використовуватися різні методи, зокрема аналітичні моделі, імітаційне моделювання, методи аналізу. Проте використання цих інструментів стикається з низкою проблем, пов'язаних з відсутністю необхідної кількісної інформації, складністю обґрунтування коректності результатів розрахунків, високою трудомісткістю оцінок, відсутністю необхідних програмних засобів тощо.

У зв'язку з проблемами високої невизначеності та складності великомасштабних систем значна частина рішень може бути отримана шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів. Для цього широко застосовуються методи SWOT-аналізу, Дельфі, а також метод аналізу ієрархій (MAI) [8].

Метод експертних оцінок (ЕО) було обрано завдяки його гнучкості та здатності враховувати різноманітні фактори, які важко формалізувати за допомогою інших методів. У процесі оцінювання ефективності інтеграції ВДЕ важливу роль відіграє аналіз технічних, економічних та екологічних аспектів, які часто не мають однозначних числових характеристик або залежать від локальних умов мережі. Експертний підхід дозволяє отримати суб'єктивні, але обґрунтовані оцінки від фахівців, які мають глибокі знання в цій сфері [9].

На відміну від методів, таких як Монте-Карло чи аналіз сценаріїв, які вимагають наявності великого обсягу даних або моделювання, метод експертних оцінок є ефективним у ситуаціях, коли дані обмежені або відсутні. Він також є більш адаптивним до специфічних особливостей енергосистеми, що важливо для врахування нестабільності генерації відновлюваних джерел [10].

Крім того, цей метод є менш ресурсозатратним порівняно з MAI чи Монте-Карло, але дозволяє отримати релевантні результати, які можуть слугувати основою для прийняття рішень. Слід підкреслити, що самі експерти, які є фахівцями в конкретних проблемних областях, не зобов'язані розуміти специфіку використання методів експертного оцінювання. Їх слід розглядати як джерела інформації та «вимірювальні прилади», на яких ґрунтуються результати експертизи.

Якість отриманих ЕО значною мірою визначається рівнем підготовки самої експертизи та застосовуваними методами обробки інформації, отриманої від експертів. Процес проведення експертного оцінювання включає кілька етапів (рис. 1), які систематично забезпечують якість і надійність отриманих результатів.

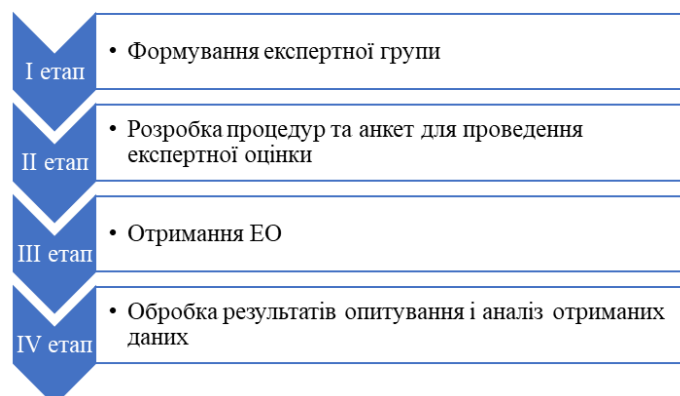


Рисунок 1. Процес проведення експертного оцінювання

Метою статті є дослідження можливостей використання експертних оцінок в задачах визначення ризиків інтеграції ВДЕ для прогнозування можливих негативних наслідків впливу об'єктів ВДЕ на режими розподільної мережі.

2. Методи та матеріали

Етап 1. Оскільки метод Дельфі є інструментом, який допомагає зрозуміти або прийняти рішення, він буде ефективним лише тоді, коли особи, які приймають рішення і які у підсумку будуть діяти на основі результатів Дельфі, будуть активно залучені до процесу. Крім того, члени експертної групи повинні мати достатню мотивацію, щоб включити завдання Дельфі у свій графік щоденних конкурентних завдань. Критично важливим питанням у всьому цьому є визначення кваліфікації членів групи експертів. Недотримання ретельно організованої процедури відбору експертів може зробити Дельфі слабким і, таким чином, зробити рішення менш релевантним.

Саме тому лист із запрошенням до участі в опитуванні було надіслано до установ, які відіграють ключову роль у формуванні енергетичної політики та забезпеченні сталого розвитку енергетичного сектору України. Серед них Міністерство енергетики України, яке здійснює загальне стратегічне планування та координацію енергетичної галузі; Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, що відповідає за регулювання енергетичних ринків та забезпечення балансу між інтересами споживачів і виробників енергії; Державна інспекція енергетичного нагляду України, яка займається моніторингом дотримання стандартів якості послуг у сфері енергетики; а також Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, яке сприяє впровадженню енергоефективних технологій та розвитку відновлюваних джерел енергії.

Етап 2. На даному етапі відбувається вибір методу збирання експертної інформації та розробка процедур її обробки. З метою перевірки кваліфікації респондентів на початку опитування експерту ставиться запитання про галузь виробничої діяльності, рівень освіти, стаж роботи та посаду [11].

Вибір даних питань можна пояснити тим, що галузь виробничої діяльності має велике значення, оскільки специфіка в різних секторах може сильно впливати на досвід і знання експерта. Також рівень освіти допомагає зрозуміти, який базовий рівень знань має експерт. Вища освіта в галузі, яка стосується досліджуваного питання, зазвичай свідчить про більш глибоке розуміння теоретичних основ та сучасних тенденцій. Відповідно, експерт із вищою освітою може надати більш детальну та обґрунтовану оцінку. Стаж роботи також є важливим, оскільки він відображає досвід експерта. Більший стаж свідчить про глибше розуміння практичних аспектів роботи в конкретній сфері. Експерт з великим стажем має більш чітке уявлення про те, як зміни в галузі можуть впливати на практичну діяльність, і може застосовувати цей досвід для оцінки поточних ситуацій. Нарешті, посада експерта допомагає визначити його рівень відповідальності та впливу на прийняття рішень в організації чи галузі. Вища посада зазвичай означає більшу залученість до стратегічного управління та глибше розуміння комплексних проблем. Тому відповідь експерта може залежати від його професійної ролі – технічної, керівної чи консультативної.

Таким чином, ці питання важливі для того, щоб отримати точну та релевантну інформацію, оцінити компетентність експерта та зрозуміти контекст його думок, що забезпечить більш обґрунтовані та корисні результати опитування.

Для ЕО використовують шкали, що ґрунтуються на прийнятій системі правил. Розрізняють чотири типи шкал: номінальну, порядкову, інтервальну та шкалу відношення [12]. Кожна з них має свої особливості та призначення залежно від характеру даних і цілей оцінювання.

Номінальна шкала використовується для найпростішого типу вимірювання, де об'єктам присвоюються значення за двома категоріями, наприклад «так» або «ні». Порядкова шкала дозволяє впорядковувати об'єкти за ступенем певної властивості, але не визначає величину відмінностей між ними. Інтервальна шкала забезпечує можливість не лише впорядковувати об'єкти, але й кількісно оцінювати різницю між ними, хоча нульова точка визначається довільно. Шкала відношення

передбачає наявність абсолютної нульової точки і використовується для кількісного вимірювання властивостей.

Вибір шкали залежить від специфіки завдання. Наприклад, для оцінювання показників чи параметрів найбільш відповідними є інтервальна чи порядкова шкала. Проте, якщо метою є не лише впорядкування, а й точне визначення величини відмінностей, інтервальна шкала забезпечує оптимальний баланс між простотою застосування та рівнем деталізації. Її використання дозволяє отримувати результати, які можна порівнювати, аналізувати та використовувати для побудови обґрунтованих висновків, навіть за відсутності абсолютної нульової точки. Тому для опитування було застосовано інтервальну шкалу, котра представлена на рис. 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Низький рівень			Середній рівень			Високий рівень		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
○	○	○	○	○	○	○	○	○

Рисунок 2. Інтервальна шкала опитування експертів

Розбиття шкали на три рівні оцінки, де кожен рівень поділяється на три бали, має кілька переваг. Така структура забезпечує простоту та зручність оцінювання. Три основні рівні (наприклад, низький, середній, високий) є зрозумілими і дозволяють легко класифікувати об'єкти чи явища. Водночас додатковий поділ кожного рівня на три бали дає змогу отримати більш точну і диференційовану оцінку. Це сприяє кращому розумінню відмінностей між об'єктами, забезпечує більшу гнучкість у процесі оцінювання та дозволяє детальніше врахувати різні аспекти, не ускладнюючи саму шкалу. Таким чином, така структура шкали поєднує простоту й точність, даючи можливість експертам надавати обґрунтовані та чіткі оцінки.

Для такої шкали застосовуються способи ранжування, парного порівняння та безпосередньої оцінки. Ранжування передбачає впорядкування об'єктів за ступенем значущості. Кожен об'єкт отримує оцінку у вигляді рангу, де 1 – найважливіший, а n – найменш значущий. Цей метод простий, але складний за великої кількості об'єктів, оскільки вимагає врахування численних взаємозв'язків.

Парне порівняння полягає в порівнянні всіх можливих пар об'єктів, де визначається, який з них є більш значущим. Цей метод дозволяє працювати з великою кількістю об'єктів і застосовувати його в ситуаціях, коли ранжування об'єктів утруднене через незначні відмінності між ними.

Безпосередня оцінка передбачає надання балів кожному об'єкту в межах певного інтервалу. Це дозволяє визначити, наскільки один об'єкт є значущим порівняно з іншими. Аргументація для використання бального способу вимірювання полягає в тому, що цей метод дає змогу не лише класифікувати об'єкти, а й визначати, наскільки суттєва різниця між ними. Бальне порівняння дозволяє експертам оцінювати об'єкти з високою точністю та дає можливість коректно відобразити різні рівні важливості або якості, що є важливим для складних експертних оцінок. Крім того, цей метод є гнучким і застосовним до різних типів об'єктів і ситуацій, що дозволяє зберігати універсальність та адаптивність під різні умови оцінювання.

Як було з'ясовано, для аналізу якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення використовується різноманітна кількість параметрів, врахувати всі ці параметри одночасно зазвичай є непрактичним, оскільки це може ускладнити процес аналізу, зробити його занадто громіздким або потребувати значних обчислювальних ресурсів. Тому застосування методу ЕО дозволить зосередитися на ключових параметрах, що визначають загальну стабільність та ефективність роботи системи, зокрема при проникненні ВДЕ.

Оскільки загальною ідеєю є зменшення ризиків, що виникають при інтеграції відновлюваних джерел енергії, то необхідно розглянути ймовірність виникнення і наслідки реалізації факторів [13], що характеризують дані ризики (табл. 1). Експертам $E_1, E_2, \dots, E_n$ було запропоновано надати кількісні

вагові значення ймовірності виникнення (бали $B_1, B_2, \dots, B_m$) та рівень наслідків впливу (бали $L_1, L_2, \dots, L_m$) запропонованих факторів $X_1, X_2, \dots, X_m$, виходячи зі своїх знань, досвіду та інтуїції. До запропонованих факторів, що впливають на ефективність та якість інтеграції ВДЕ до систем розподілу, відносяться: виникнення вищих гармонік; зменшення інерційності системи; збільшення рівня напруги; коливання напруги; зменшення коефіцієнта потужності; збільшення втрат та перетоків електричної енергії; розбалансування електричної мережі та підживлення струмів короткого замикання [14].

Таблиця 1. Формульний запис бальної оцінки запропонованих факторів

Код експерта (респондента)		Ймовірність виникнення фактора ($j = 1, 2, \dots, m$)				Рівень наслідків впливу фактора ($j = 1, 2, \dots, m$)			
		X_1	X_2	$\dots$	X_m	X_1	X_2	$\dots$	X_m
$i = 1, 2, \dots, n$	E_1	B_{11}	B_{12}	$\dots$	B_{1m}	L_{11}	L_{12}	$\dots$	L_{1m}
	E_2	B_{21}	B_{22}	$\dots$	B_{2m}	L_{21}	L_{22}	$\dots$	L_{2m}
	E_3	B_{31}	B_{32}	$\dots$	B_{3m}	L_{31}	L_{32}	$\dots$	L_{3m}
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
	E_n	B_{n1}	B_{n2}	$\dots$	B_{nm}	L_{n1}	L_{n2}	$\dots$	L_{nm}
$\frac{\sum_{j=1}^n B_{ij}}{n} = \bar{B}_j$ $\frac{\sum_{j=1}^n L_{ij}}{n} = \bar{L}_j$		B_1	B_2	$\dots$	B_m	L_1	L_2	$\dots$	L_m

Вищезгадані засади опитування були реалізовані за допомогою *Google* Форми [15]. Це рішення було обрано з кількох причин. По-перше, *Google* Форми дозволяють швидко створити анкети, які можна легко адаптувати під будь-які вимоги, оскільки формат *Google* Форм дає змогу налаштувати різноманітні типи питань, такі як текстові відповіді, варіанти вибору, шкали оцінки тощо, що робить опитування зручним і структурованим. По-друге, *Google* Форми автоматично збирають відповіді в таблиці, що значно спрощує подальшу обробку та аналіз даних. Це дозволяє оперативно оцінити відповіді експертів, класифікувати їх за заданими параметрами (наприклад, за галуззю чи рівнем освіти), а також виявити потенційні закономірності або розбіжності в оцінках. Також важливою перевагою є доступність та зручність використання. *Google* Форми легко заповнюються як на комп'ютерах, так і на мобільних пристроях, що забезпечує широкий доступ до опитування. Крім того, форма може бути надіслана за допомогою посилання або електронної пошти, що значно полегшує процес збору даних від великої кількості респондентів.

Опитування було здійснено в анонімному форматі, що забезпечує об'єктивність і щирість відповідей. Анонімність дозволила експертам висловлювати свої думки без побоювань щодо можливого впливу на їхню професійну репутацію або стосунки з роботодавцем. Такий підхід сприяє отриманню чесних і неупереджених відповідей, що підвищує достовірність результатів дослідження.

Етап 3. Експертам був наданий час для роздумів і надання відповіді протягом 2,5 тижнів з кількох причин. Насамперед, це забезпечує достатній час для ретельного аналізу запитів та оцінки об'єктів. Експертам необхідно мати змогу повністю осмислити інформацію, дослідити всі аспекти питання і сформулювати обґрунтовану відповідь. Це важливо для забезпечення високої якості оцінок, особливо у випадках, коли рішення мають значний вплив на результати дослідження або прийняття рішень.

Водночас, оскільки йдеться про державні установи, які мають внутрішні процедури для обробки вхідних листів, надання відповіді може вимагати часу на їх опрацювання та призначення відповідальних осіб через бюрократичні процеси. Державні органи часто мають певні регламенти та формальності щодо оформлення та потоку документів, які потребують додаткового часу для погодження, перевірки та опрацювання на різних рівнях. Таким чином, надання такого терміну дозволяє врахувати ці внутрішні процедури і забезпечити своєчасне та коректне виконання запиту.

Етап 4. У проведеному опитуванні взяли участь 57 експертів, що свідчить про значну зацікавленість та готовність спеціалістів поділитися своїм досвідом і знаннями.

Групова експертна оцінка може вважатися надійною тільки за умови узгодженості відповідей експертів. Для аналізу розбіжностей і узгодженості оцінок використовуються статистичні характеристики, зокрема міри розкиду [16]. Ось кілька основних мір розкиду:

Варіаційний розмах (R) – це найпростіший показник варіативності, що визначається як різниця між максимальною та мінімальною оцінкою, наданою експертами. Це дає загальне уявлення про широту оцінок, однак не враховує розподілу оцінок усередині цього діапазону. Формула для обчислення варіаційного розмаху така:

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (1)$$

де: $x_{\max}$ – максимальна оцінка; $x_{\min}$ – мінімальна оцінка об'єкта.

Варіаційний розмах показує, наскільки великі розбіжності є між найбільш високою та низькою оцінками, однак не дає детальної інформації про те, як розподіляються оцінки в межах цього діапазону.

Середнє квадратичне відхилення (σ) – це більш детальний показник варіативності, який дозволяє з'ясувати, наскільки відповіді експертів відрізняються від середнього значення оцінок групи. Це корисно для виявлення коливань у відповідях, коли різниця між оцінками значно більша або менша за середнє значення. Формула для обчислення середнього квадратичного відхилення виглядає так:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}{m-1}}, \quad (2)$$

де: x_j – оцінка, надана j -м експертом; $\bar{x}$ – середнє арифметичне оцінок групи експертів, m – кількість експертів.

Коефіцієнт варіації (V) – це статистична міра, яка дозволяє оцінити відносну варіативність оцінок у відсотках. Вона дозволяє порівнювати варіативність між різними групами оцінок, навіть якщо їх середні значення значно відрізняються. Коефіцієнт варіації обчислюється за формулою

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Коефіцієнт варіації дає змогу побачити, наскільки великий розкид оцінок у відношенні до середнього значення, і дає можливість порівнювати варіативність між різними наборами оцінок з різними середніми значеннями.

Для визначення значущості кожного фактора $X_1, X_2, \dots, X_m$ на основі оцінок експертів потрібно обчислити сумарну оцінку для кожного фактора. Це робиться шляхом додавання значень ймовірності виникнення $\overline{B_j}$ та рівня наслідків впливу $\overline{L_j}$ для кожного фактора

$$S_j = \overline{B_j} + \overline{L_j}. \quad (4)$$

Варто зазначити, що максимальний бал для кожного фактора становить 18. Це обумовлено тим, що в анкеті використовувалася 9-бальна шкала для оцінки ймовірності B та наслідків L . При цьому, застосовуючи додавання, можна скласти ці оцінки та отримати комбіновану величину, яка наочно демонструє загальну значущість кожного фактора.

3. Результати

Обробку результатів експертного опитування необхідно розпочати з аналізу характеристик самих експертів, зокрема їхньої галузі діяльності, рівня освіти, стажу роботи та займаної посади. Це дозволить оцінити компетентність і різноманітність поглядів учасників опитування, а також визначити рівень репрезентативності отриманих даних. Такий підхід забезпечить ґрунтовну основу для подальшого аналізу та інтерпретації результатів опитування.

Результати опитування щодо галузі діяльності (рис. 3) демонструють, що основна частина респондентів (41 особа) працює в галузі електроенергетики, що свідчить про фокус опитування саме на цій сфері.

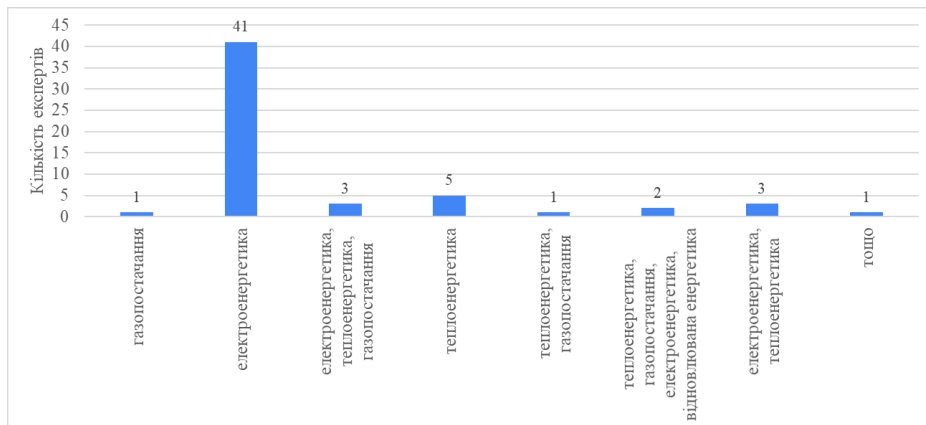


Рисунок 3. Галузі діяльності експертів

Деякі учасники вказали кілька галузей одночасно, таких як електроенергетика, теплоенергетика і газопостачання, що відображає міжгалузевий характер їхньої діяльності та взаємозв'язок цих сфер. Наприклад, комбіновані відповіді «електроенергетика, теплоенергетика, газопостачання та відновлювана енергетика» (2 респонденти) вказують на мультидисциплінарний підхід у роботі таких спеціалістів.

Теплоенергетика окремо була вказана п'ятьма респондентами. Газопостачання було зазначено лише одним респондентом як єдина сфера діяльності, що свідчить про відносно низьку представленість цієї галузі у вибірці. Варіанти відповідей, що містять формулювання «тощо», є менш інформативними, проте можуть свідчити про галузі, які опитані респонденти не змогли чітко класифікувати або вважали менш значущими для зазначення. Таким чином, дані свідчать про домінування електроенергетики в опитуванні.

Аналіз рівня освіти експертів (рис. 4) показує, що переважно всі мають високий рівень кваліфікації. Найбільшу частку складають спеціалісти – 46 осіб, що становить приблизно 81 % від загальної кількості. Магістри представлені у меншій кількості – 10 осіб, або близько 17 %, що також вказує на високий рівень освіченості частини експертів. Бакалаврів лише один, що становить близько 2%. Це свідчить про наявність повної вищої освіти в учасників опитування. Загалом рівень освіти експертів демонструє їхню кваліфікаційну спроможність для участі в оцінюванні.

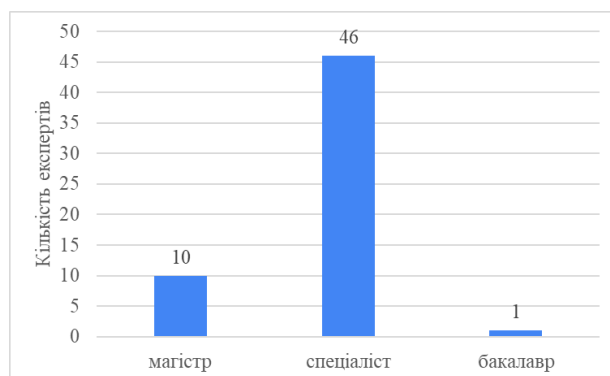


Рисунок 4. Рівень освіти експертів у зазначеній галузі

Результати аналізу стажу роботи експертів (рис. 5) демонструють широкий спектр професійного досвіду, що забезпечує всебічний погляд на предмет дослідження. Найбільшу частину становлять фахівці, які мають стаж роботи від 16 до 25 років. Це свідчить про переважання експертів, які знаходяться на піку своєї кар'єри і поєднують значний практичний досвід із сучасними знаннями та методами роботи.

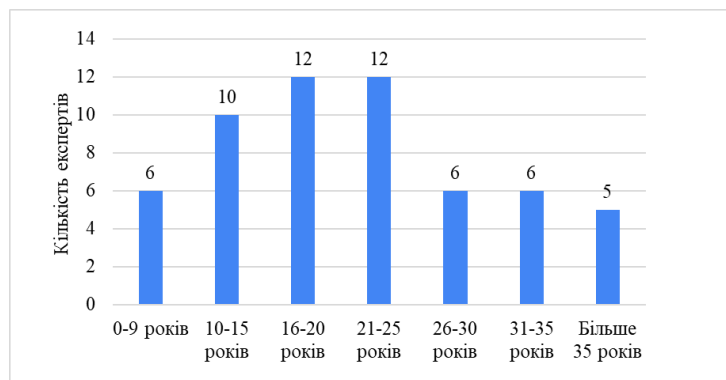


Рисунок 5. Стаж роботи експертів у зазначеній галузі

Помітна присутність спеціалістів зі стажем від 10 до 15 років є свідченням активної участі середнього покоління професіоналів, які, здебільшого, вже накопичили достатній досвід, але водночас продовжують удосконалювати свої навички та знання. До того ж, участь молодших фахівців зі стажем до 9 років створює перспективу інноваційного підходу до розв'язання поставлених завдань.

Цінним є залучення експертів із понад 30 роками стажу, які представляють покоління, що формувало сучасну галузь. Їх участь дозволяє врахувати уроки минулого та забезпечити стратегічний підхід до вирішення сучасних проблем. Таким чином, поєднання різних поколінь та рівнів професійного досвіду формує міцну основу для якісного експертного оцінювання, сприяючи отриманню збалансованих і обґрунтованих результатів.

Аналізуючи розподіл експертів за посадами (рис. 6), можна помітити декілька важливих аспектів. Найбільша кількість експертів зосереджена на посадах «інспектор» та «фахівець» – по 14 осіб у кожній категорії. Помітна також участь 6 інженерів, що може означати залучення технічних експертів. Відповіді від 9 керівників та 1 керівника відділу репрезентують управлінське бачення процесу. Категорія «інше» налічує чотири особи, що може вказувати на наявність унікальних або комбінованих посад, які не підпадають під стандартні класифікації. Таким чином, структура посад свідчить про значну різноманітність ролей та функцій у виробничій діяльності експертів.

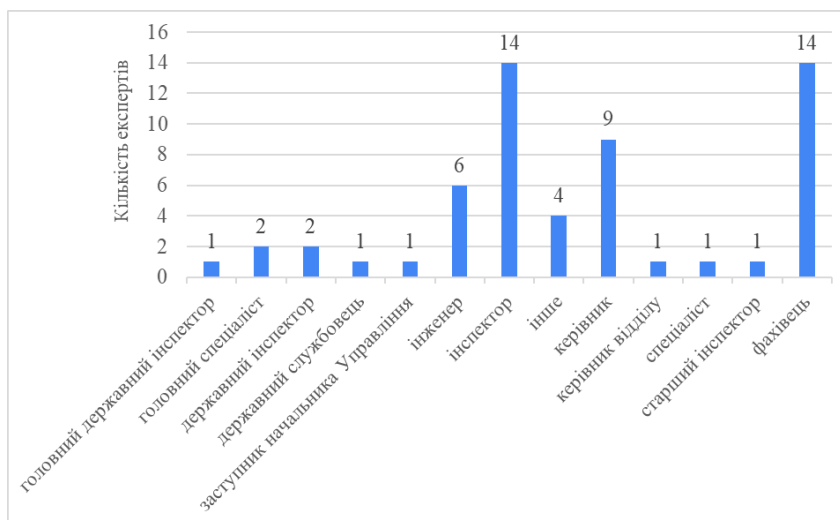


Рисунок 6. Розподіл експертів за посадами

На першому етапі аналізу результатів опитування основну увагу було приділено виявленню крайніх відхилень у відповідях експертів. Для цього відповіді по кожному фактору були відсортовані за зростанням, що дозволило визначити, які оцінки мають найменші або найбільші значення. У разі, якщо кількість таких крайніх значень була 1 чи 2, відповідні клітинки були зафарбовані, що допомогло візуально виділити ці відхилення.

Це дозволило виявити експертів, які давали найбільш радикальні оцінки. Наприклад, експерт № 5 надав 9 з 18 таких крайніх відповідей, а експерт №33 – 6. Такі результати можуть свідчити про те, що експерт не зовсім відповідально ставився до завдання або виявляв надмірну категоричність у своїх оцінках. У таких випадках є підстави для подальшого виключення цих експертів із розрахунку, оскільки їхні відповіді можуть спотворювати загальні результати і знижувати надійність експертної оцінки.

До того ж, використання цього механізму дозволяє оцінити рівень узгодженості відповідей серед експертів. Визначення крайніх значень є важливим інструментом для виявлення потенційних проблем у процесі збору даних, таких як суб'єктивність або недбалий підхід до виконання завдання. Тому виключення експертів з надмірними відхиленнями є важливою складовою підвищення точності і достовірності підсумкових результатів.

Отримані основні міри розкиду зведені в табл. 2 для зручності порівняння та аналізу розбіжностей в оцінках, наданих експертами.

Таблиця 2. Аналіз розбіжностей і узгодженості ЕО

Фактори Міра розкиду	Виникнення вищих гармонік	Зменшення інерційності системи	Збільшення рівня напруги	Коливання напруги	Зменшення коефіцієнта потужності	Збільшення втрат та перетоків електричної енергії	Розбалансування електричної мережі	Підживлення струмів короткого замикання
Ймовірність виникнення фактора								
R	5	6	8	6	6	6	7	7
σ	1,38	1,33	1,70	1,39	1,36	1,45	1,69	1,37
V	28,1	28,0	29,3	26,0	29,1	30,5	34,0	30,9
Рівень наслідків впливу фактора								
R	5	7	8	6	5	6	7	7
σ	1,24	1,40	1,71	1,41	1,30	1,48	1,58	1,29
V	25,4	29,2	30,6	27,0	28,9	31,8	32,7	30,4

Значення варіації говорить про те, що стандартне відхилення становить 30 % від середнього значення. Це вказує на помірний рівень відхилення експертних оцінок та означає, що є певна варіативність у думках, але вона не є надто високою. Оскільки мова йде про суб'єктивні експертні оцінки, то варіативність на рівні 0,3 може вважатися нормальною, що свідчить про деякі розбіжності в поглядах експертів, але не про критичний рівень.

Після проведення перевірки узгодженості експертних думок переходимо до обробки отриманих відповідей. Наступний крок передбачає аналіз значущості запропонованих факторів шляхом обчислення їх ваг на основі наданих експертами оцінок ймовірності виникнення та рівня наслідків впливу.

Після цього, за допомогою відносних одиниць, можна порівняти результати різних факторів, оскільки вони будуть приведені до єдиного стандарту, що дає змогу виділити найбільш критичні фактори, необхідні для подальшого дослідження. Такий спосіб є більш наочним і зручним для інтерпретації результатів порівняно з перемноженням, яке може призвести до ускладнення порівняння. Результати розрахунків наведено у табл. 3, а графічна інтерпретація зображена на рис. 7.

Таблиця 3. Аналіз та опрацювання ЕО

Фактори Показник значущості	Виникне ння вищих гармонік	Зменше ння інерційн ості системи	Збільшен ня рівня напруги	Коливан ня напруги	Зменшення коефіцієнта потужності	Збільшенн я втрат та перетоків електрично ї енергії	Розбалан сування електрич ної мережі	Підживлення струмів короткого замикання
$\bar{B}_j$, бали	4,91	4,76	5,78	5,36	4,67	4,76	4,98	4,44
$\bar{L}_j$, бали	4,89	4,78	5,58	5,24	4,51	4,65	4,82	4,25
S_j , бали	9,80	9,55	11,36	10,60	9,18	9,42	9,80	8,69
$S_j / S_{\max}$, в.о.	0,544	0,530	0,631	0,589	0,510	0,523	0,544	0,483
$S_j / S_{\max}$, %.	54,4	53,0	63,1	58,9	51,0	52,3	54,4	48,3

Таблиця 3 демонструє значення, які є відсотковими показниками від максимально можливого значення, що відображають значущість кожного фактора, пов'язаного з ризиками інтеграції відновлюваних джерел енергії.

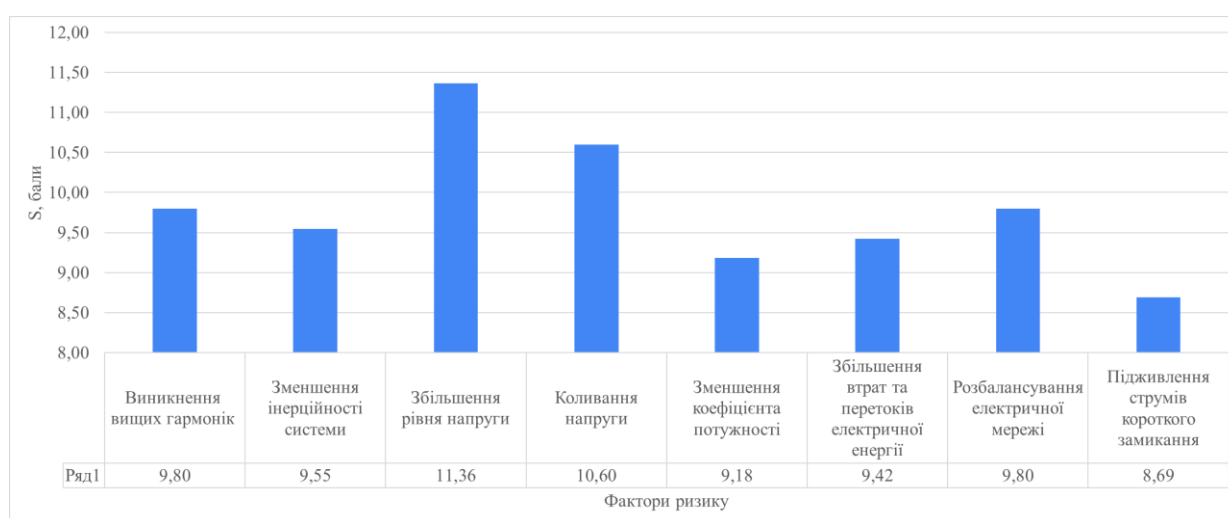


Рисунок 7. Визначення значущості факторів ризику

4. Обговорення

Найвищу значущість має фактор «Збільшення рівня напруги» зі значенням 63,1 %, що свідчить про його найвагомійший вплив у загальній системі. Найменше значення спостерігається у фактора «Підживлення струмів короткого замикання» – 48,3 %, що вказує на його відносно нижчу важливість порівняно з іншими.

Фактори «Виникнення вищих гармонік» та «Розбалансування електричної мережі» мають однакові значення (54,4 %), що може свідчити про їх схожий вплив на систему. Інші фактори, такі як «Зменшення інерційності системи» (53 %), «Коливання напруги» (58,9 %), «Зменшення коефіцієнта потужності» (51 %) та «Збільшення втрат і перетоків електричної енергії» (52,3 %), демонструють середній рівень значущості.

Розподіл значень показує, що більшість факторів перебувають у діапазоні 50–60 %, що свідчить про їх відносно рівномірний вплив, проте фактор «Збільшення рівня напруги» суттєво виділяється серед інших.

Для забезпечення комплексного підходу до оцінки ризиків інтеграції відновлюваних джерел енергії доцільно сформулювати багатокритеріальний показник, який враховує різноплановість представлених факторів. Зокрема, виникнення вищих гармонік, збільшення рівня напруги та зменшення коефіцієнта потужності можна врахувати завдяки нормованим значенням і можливостям їх моделювання, що дозволяє передбачити вплив і використати систему управління для зменшення цього впливу.

Збільшення втрат і перетоків електричної енергії необхідно врахувати через встановлення обмеження на зворотний потік електроенергії у напрямку мережі вищої напруги. Це забезпечить відповідність потужності відновлюваних джерел енергії навантаженню вузла і збереже функціональність понижувальних трансформаторів.

Проблема підживлення струмів короткого замикання вирішується через налаштування / модернізацію релейного захисту та автоматики [17], які можна передбачити ще на етапі видачі технічних умов.

Коливання напруги (флікер) можна мінімізувати шляхом встановлення пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності, таких як статичні синхронні компенсатори або акумулятори енергії, які швидко реагують на зміни в мережі [18]. Або ж це питання закривається використанням високоякісних інверторів із функцією динамічного регулювання потужності, що дає змогу згладжувати короточасні коливання, які виникають через зміни генерації ВДЕ [19].

Розбалансування електричної мережі також усувається обмеженням перетоків на вищі рівні напруги. Додатково можна використовувати автоматизовані системи вирівнювання навантажень [20]. Уникнути зменшення інерційності енергосистеми можна опосередковано також через впровадження обмежень на переток електроенергії, що змусить власників відновлюваних джерел енергії встановлювати акумулююче обладнання.

Таким чином, кожен із факторів або включається до розрахунку узагальненого показника, або вирішується за допомогою технічних засобів і обмежень на етапі ТУ, що дозволяє виключити його з подальших обчислень.

5. Висновки

Для аналізу ризиків складних систем можуть використовуватися різні методи, зокрема аналітичні моделі, імітаційне моделювання, методи аналізу. Проте метод експертних оцінок дозволяє враховувати різноманітні фактори, які важко формалізувати за допомогою інших методів. У процесі оцінювання ефективності інтеграції ВДЕ важливу роль відіграє аналіз технічних, економічних та екологічних аспектів, які часто не мають однозначних числових характеристик або залежать від локальних умов мережі.

Використання експертних оцінок дозволило створити багатофакторну оцінку ризиків, за рахунок якої можна прогнозувати можливі негативні наслідки об'єктів відновлюваних джерел енергії на режими розподільної мережі. Отримані результати дозволили виділити фактори, що мають найбільший вплив на розподільну мережу при інтеграції ВДЕ. Для забезпечення комплексного підходу до оцінки ризиків інтеграції відновлюваних джерел енергії в подальших дослідженнях необхідно сформулювати багатокритеріальний показник, який враховує різноплановість факторів на основі ЕО.

Внесок авторів. Концептуалізація дослідження, науковий супровід, перевірка методології, результати та обговорення, висновки – Анатолій Замулко; аналіз та систематизація інформації, матеріали дослідження, проведення експертного оцінювання, огляд літератури – Віталій Степаненко.

Посилання

1. Clean energy for all Europeans package. Energy. An official website of the European Union. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en (Last accessed: 05.08.2024).
2. Petinrin J. O., Shaabanb M. Impact of renewable generation on voltage control in distribution systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Т. 65. С. 770–783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.073>
3. Belcher B., Petry B. J., Davis T., Hatipoglu K. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: Technology review and PSAT simulations (30 March – 2 April 2017, Concord, NC, USA). SoutheastCon 2017. <https://doi.org/10.1109/secon.2017.7925361>
4. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Гунько І.О. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 3(41). С. 7–13. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15204> (дата звернення: 21.06.2024).

5. Quan H., Yang D., Khambadkone A. M., Srinivasan D. A Stochastic Power Flow Study to Investigate the Effects of Renewable Energy Integration. *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)* (22–25 May 2018, Singapore). <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2018.8467977>
6. Терьохін О.О. Керування електроприводом на базі напівпровідникових перетворювачів з оцінкою якості електроенергії: магістерська робота. 2019. 95 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30639> (дата звернення: 07.05.2024).
7. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. На заміну ДСТУ EN 50160:2014; чинний від 2023-12-08. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ».
8. Степаненко В.А., Замулко А.І., Веремійчук Ю.А., Находов В.Ф. Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 2. С. 64–74. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372>
9. Олексієнко Р., Донець А. Місце експертної оцінки у прийнятті управлінських рішень. *Економіка та суспільство*. 2021. № 26. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-59>
10. Shao M., Han Z., Sun J., Xiao C., Zhang S., Zhao Y. A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 157. P. 377–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137>
11. Шостак І.В. Анкетування: методичні рекомендації щодо організації та проведення соціологічного дослідження. Острог, 2021. 40 с.
12. Пономарьова Н.О., Голиш І.Є. Основи опрацювання статистичних даних: навч. посіб. для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищ. освіти за спец. 014 Середня освіта (Інформатика). Харківський національний педагогічний університет ім. Г.С. Сковороди. Харків, 2025. 169 с.
13. Zamulko A., Veremiichuk Y., Stepanenko V. Formation of risk profile for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2022. Vol. 6. Iss. 4. P. 119–127. URL: <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2023/02/FORMATION-OF-RISK-PROFILE-FOR-THE-INTEGRATION.pdf> (Last accessed: 12.05.2024).
14. Stepanenko V., Zamulko A., Veremiichuk Y. Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. Iss. 1. P. 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012043>
15. Оцінка впливу інтеграції ВДЕ до систем розподілу. Google Docs. URL: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSetajxBcuKtYAADHDJ48yoCHKKgBYRcH-XS6AOi5kDd0H1g/closedform> (дата звернення: 05.10.2024).
16. Карпінський Б., Карп'як А., Рибицька О. Кластеризаційні методи в ціннісному підході при порівняльному розподілі інформаційно-технологічних підприємств у ринковому просторі. *Věda a perspektivy*. 2022. № 6(13). С. 121–140. [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6\(13\)-121-140](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6(13)-121-140)
17. Сиченко В.Г. Інтеграція сонячних електростанцій у систему тягового електропостачання постійного струму. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2015. № 12(1121). С. 364–368. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2015_12_0.pdf (дата звернення: 20.06.2024).
18. Бурбело М.Й., Лобода Ю.В., Лебедь Д.Ю. Система прямого керування струмом активного фільтра. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. Т. 155. № 2. С. 69–75. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-69-75>
19. Фесенко А.П. Інвертор з широким діапазоном регулювання вхідної напруги та покращеними масогабартними параметрами: дис. ... д-ра філософії. Чернігів, 2023. 154 с. URL: <https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28731> (дата звернення: 10.06.2024).
20. Савченко О.А. Автоматизовані системи контролю та керування енергоспоживанням: конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Державний біотехнологічний ун-т. Харків: [б. в.], 2024. 87 с.

References

1. Clean energy for all Europeans package. Energy. An official website of the European Union. Retrieved August 5, 2024, from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en
2. Petinrin, J. O., & Shaabanb, M. (2016). Impact of renewable generation on voltage control in distribution systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 770–783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.073>
3. Belcher, B., Petry, B. J., Davis, T., & Hatipoglu, K. (2017, 30 March – 2 April). The effects of major solar integration on a 21-Bus system: Technology review and PSAT simulations. *SoutheastCon 2017*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/secon.2017.7925361>
4. Lezhnyuk, P., Rubanenko, O., & Gunko, I. (2015). The influence of solar power plants on voltage of 0.4 kv consumers. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 3(41), 7–13. Retrieved June 21, 2024, from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/15204> [in Ukrainian].

5. Quan, H., Yang, D., Khambadkone, A. M., & Srinivasan, D. (2018, May 22–25). A Stochastic Power Flow Study to Investigate the Effects of Renewable Energy Integration. *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2018.8467977>
6. Terokhin, O.O. (2019). Control of an electric drive based on semiconductor converters with an assessment of the quality of electricity [Master's thesis, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”]. ELAKPI – Electronic archive of scientific and educational materials of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved May 7, 2024, from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30639> [in Ukrainian].
7. DSTU EN 50160:2023 Characteristics of the supply voltage in general-purpose electrical networks (EN 50160:2022, IDT) [in Ukrainian].
8. Stepanenko, V., Zamulko, A., Veremiichuk, Y., & Nakhodov, V. (2022). Assessment of risk for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 2, 64–74 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372>
9. Oleksienko, R., & Donets, A. (2021). Place of the expert assessment in management decision-making. *Economy and Society*, 26 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-59>
10. Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137>
11. Shostak, I.V. (2021). Questionnaire survey: methodological recommendations for organizing and conducting a sociological survey. Ostroh (40 p.) [in Ukrainian].
12. Ponomariova, N., & Golysh, I. (2025). Fundamentals of statistical data processing: a textbook for applicants for the first (bachelor's) level of higher education in specialty 014 Secondary education (Informatics). H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University. Kharkiv (169 p.) [in Ukrainian].
13. Zamulko, A., Veremiichuk, Y., & Stepanenko, V. (2022). Formation of risk profile for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 6(4), 119–127. Retrieved May 12, 2024, from <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2023/02/FORMATION-OF-RISK-PROFILE-FOR-THE-INTEGRATION.pdf>
14. Stepanenko, V. A., Zamulko, A. I., & Veremiichuk, Y. A. (2023). Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012043>
15. Assessment of the impact of RES integration into distribution systems. Google Docs. Retrieved October 5, 2024, from <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSetajxBcuKtYAADHDJ48yoCHKKgBYRcHX56AOi5kDd0H1g/closedform> [in Ukrainian].
16. Karpinsky, B., Karpyak, A., & Rybyska, O. (2022). Clusterization methods in the value approach in the comparative distribution of information and technological enterprises in market space. *Věda a perspektivy*, 6(13), 121–140 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6\(13\)-121-140](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6(13)-121-140)
17. Sichenko, V. (2015). Integration of solar power plants into the DC traction power supply system. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*, 12(1121), 364–368. Retrieved June 20, 2024, from http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2015_12_0.pdf [in Ukrainian].
18. Burbelo, M. Y., Loboda, Y. V., & Lebed, D. Y. (2021). Active Filter Current Direct Control System. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 155(2), 69–75 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-69-75>
19. Fesenko, A. (2023). Inverter with a wide range of input voltage adjustment and improved mass-size parameters [Doctoral dissertation, Chernihiv Polytechnic National University]. Retrieved June 10, 2024, from <https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28731> [in Ukrainian].
20. Savchenko, O.A. (2024). Automated systems of control and management of energy consumption: lecture notes for applicants for the second (master's) level of higher education of full-time and part-time education in specialty 141 “Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics”. State Biotechnological University, Kharkiv [in Ukrainian].

EXPERT ASSESSMENT METHODS IN THE TASKS OF DETERMINING THE RISKS OF INTEGRATING RENEWABLE ENERGY SOURCES

Anatolii Zamulko*, PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-8018-6332>
Vitalii Stepanenko, <https://orcid.org/0000-0001-6176-589X>

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

*Corresponding author: zamulko.anatolii@lil.kpi.ua

Abstract. *The article investigates the use of expert evaluation methods in the tasks of determining the risks of integrating renewable energy sources (RES). The relevance of the work lies in the fact that the connection of RES to distribution networks with stochastic characteristics of their operation significantly affects the modes of operation of the electric grid. As a result, the parameters of electricity supplied to consumers do not meet the parameters established by the standard. The purpose of the article is to study the possibilities of using expert assessments in the tasks of determining the risks of RES integration to predict the possible negative consequences of the impact of RES facilities on the modes of the distribution network. The research methodology is based on the use of experts' knowledge and experience to solve complex or insufficiently formalized problems when objective data is absent or insufficient. As a result of studying the methods of risk analysis of complex systems, it has been found that the use of the expert assessment method makes it possible to focus on the key parameters that determine the overall stability and efficiency of the system under conditions of high uncertainty. In order to achieve the tasks set out in this paper, an expert group was formed, a procedure and a questionnaire for conducting an expert assessment were developed, the results of the survey were processed and the data obtained were analyzed. The analysis of the consistency of expert opinions indicates a moderate level of deviation and an acceptable level of differences in the opinions of the group members. The use of the expert assessment method made it possible to obtain a structured assessment of the risks and significance of various factors. To ensure a comprehensive approach to assessing the risks of RES integration, it is advisable to form a multi-criteria indicator that will take into account the diversity of factors based on expert assessments.*

Keywords: expert evaluation methods, risk assessment, renewable energy sources, decision-making.

Надійшла до редколегії: 25.03.2025