

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Метою дослідження є розробка та апробація інтегрованого методичного підходу для комплексної оцінки безпеки постачання електроенергії. Завдання включали аналіз індикативних підходів, їх інтеграцію з методами підтримки прийняття рішень (АНР, TOPSIS) та нечіткої логіки для об'єктивізації оцінок, а також порівняльний аналіз результатів.

Методика реалізації поєднує індикативний підхід з АНР для визначення вагових коефіцієнтів, TOPSIS для ранжування, та нечітку логіку для обробки лінгвістичних та нечітких даних. Використано ключові індикатори безпеки постачання електричної енергії. Розроблено алгоритми розрахунку інтегральних показників безпеки. Результати дослідження показали, що індикативний підхід, TOPSIS, АНР та нечітка логіка надають власні оцінки рівня безпеки, які якісно збігаються, вказуючи на низький або критичний рівень. Розбіжності в числових значеннях підтверджують доцільність комбінованого застосування методів для всебічної та об'єктивної оцінки, враховуючи кількісні та якісні аспекти.

Висновки підкреслюють ефективність інтеграції цих методів для комплексної оцінки безпеки постачання електроенергії. Їх поєднання надає більш повну та достовірну картину стану енергосистеми, дозволяючи ідентифікувати проблемні зони та обґрунтувати заходи для підвищення безпеки. Методи можуть взаємодоповнювати один одного, забезпечуючи як точні кількісні оцінки, так і врахування суб'єктивних експертних суджень.

Ключові слова: безпека енергопостачання, моніторинг, індикативний підхід, багатокритеріальна оцінка, нечітка логіка, АНР, TOPSIS, інтегральний показник.

Вступ.

Безпека постачання електричної енергії – критично важлива складова функціонування економіки та енергетичної системи країни, особливо в умовах інтеграції енергосистеми України до європейської ENTSO-E та паралельного функціонування з європейськими мережами. На ринку електроенергії головним питанням зазвичай є ціна, однак стабільність та безперебійність постачання мають не менш істотне значення для національної безпеки. З огляду на це, необхідно оцінювати безпеку постачання за різними характеристиками і влаштовувати систематичний моніторинг ключових показників.

Моніторинг технічного стану енергетичної інфраструктури (електростанцій, мереж передачі тощо) та аналіз відхилень фактичних показників від нормативних дозволяють виявляти ризики та забезпечувати попереджувальні заходи. У наукових дослідженнях для оцінки надійності та стабільності енергосистеми застосовують різні підходи: індикативний підхід, багатокритеріальні методи (АНР, TOPSIS), нечітку логіку тощо.

Слід зазначити, що на даний момент не існує єдиних методичних підходів в країнах Європи, які оцінюють безпеку постачання електричної енергії. Тому необхідно проводити пошук різних не однонаправлених підходів для більш релевантної оцінки безпеки постачання.

Водночас, більшість існуючих методик орієнтовані на оцінку поточного стану, але не дають можливості формувати прогностичні моделі або інтегрувати результати в оперативне управління системою. Існує потреба у створенні комплексних, гнучких і адаптивних підходів, які б не лише діагностували рівень безпеки постачання, але й дозволяли б приймати обґрунтовані рішення для її підвищення.

Таким чином, актуальною науковою і практичною проблемою є розробка та впровадження підходів до визначення інтегрованих показників [1], які б об'єднували декілька методів оцінки, дозволяли б враховувати специфіку енергетичного ринку та сьогоденні виклики. Такий підхід дає змогу підвищити точність ідентифікації прогалин, забезпечити адаптацію енергосистеми до кризових ситуацій та сприяти зміцненню безпеки постачання електричної енергії в цілому.

Мета роботи: створення загальних підходів до науково методичних засад комплексного оцінювання безпеки постачання електроенергії на основі індикативного підходу та альтернативних математичних методів, а також здійснення апробації їх використання

Матеріал і результати дослідження.

Безпека постачання електричної енергії є багатогранною проблемою, що вимагає комплексного підходу до її оцінки та підвищення. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із децентралізацією генерації, інтеграцією відновлюваних джерел енергії, ризиками кібератак та фізичних пошкоджень інфраструктури, науковці та інженери розробляють і вдосконалюють різноманітні методи для забезпечення стабільності та надійності електропостачання. Аналіз останніх досліджень дозволяє виділити ключові напрямки та інструменти, що застосовуються для вирішення цих завдань. Загальні характеристики математичних методів оцінки в задачах оцінки безпеки постачання електричної енергії представлені в таблиці 1. Виконано порівняльний аналіз використання математичних методів в задачах оцінки безпеки постачання електричної енергії що зображено в таблиці 2.

Проведений аналіз свідчить, що жоден з методів не є універсальним і не може самостійно вирішити всі задачі оцінки та підвищення безпеки постачання електроенергії. Ефективне рішення полягає у комплексному застосуванні кількох підходів. Для цілей даної статті, що передбачає розробку комплексної методики, найбільш доцільним є поєднання кількох інструментів.

Зокрема, індикативний підхід є ідеальним для формування верхньорівневої структури оцінки, дозволяючи агрегувати різноманітні показники в інтегральні індекси безпеки. Однак, визначення вагових коефіцієнтів для цих індикаторів є суб'єктивним процесом, який вимагає експертної участі. Для вирішення цієї проблеми підходить метод аналізу ієрархій (АНР), який формалізує процедуру експертного оцінювання та дозволяє обґрунтовано розрахувати ваги критеріїв на основі попарних порівнянь.

При оцінці багатьох показників, особливо технічного стану обладнання, часто бракує точних кількісних даних. Тут незамінною є нечітка логіка, яка дозволяє враховувати неповну інформацію та якісні експертні оцінки.

Нарешті, коли на основі комплексної оцінки необхідно обрати та проранжувати найкращі заходи чи стратегії з підвищення безпеки (наприклад, модернізація підстанції, будівництво нової лінії, впровадження системи кіберзахисту), виникає задача багатокритеріального вибору. Метод TOPSIS є придатним для цієї ролі, оскільки він дозволяє швидко та ефективно порівняти велику кількість альтернативних рішень за множиною критеріїв, визначених на попередніх етапах, та вибрати найбільш збалансований варіант. Таким чином, синергія індикативного підходу, нечіткої логіки, АНР та TOPSIS створює потужний та гнучкий інструментарій для комплексної оцінки та підвищення безпеки постачання електричної енергії.

Аналіз теоретичних основ математичних методів. Для оцінювання безпеки постачання електричної енергії використовуються різні методи, що доповнюють одне одного. Нижче здійснено розгляд індикативного підходу та основних математичних методів оцінки.

Індикативний (індикаторний) підхід. Індикативний підхід передбачає оцінювання системи на основі набору показників (індикаторів), які характеризують її стан і ефективність. Показники можуть бути організовані в групи (компоненти безпеки) і перетворюватися на інтегральні індикатори (середньозважені або сумарні) для узагальненої оцінки. Таким чином, в статті запропоновано [12] поділ безпеки електропостачання на п'ять складових: балансова надійність ОЕС і якість технічного обслуговування мереж, забезпечення первинними енергоресурсами (постачання палива), стабільність роботи ринку, оперативна безпека та кібербезпека. Оцінка рівня безпеки постачання електричної енергії розраховується за наступною формулою:

$$I_m = \sum_{i=1}^n d_i y_i, \quad (1)$$

де I_m – оцінка рівня безпеки постачання електричної енергії;

d_i – ваговий коефіцієнт, що визначає ступінь внеску i -го інтегрального індикатора в оцінку рівня безпеки постачання електричної енергії;

y_i – оцінка i -го середньозваженого інтегрального індикатора.

Індикативний підхід широко застосовується в макроплануванні та управлінні (наприклад, оцінка ВВП, інфляції, економічних КРІ тощо), оскільки дозволяє вести систематичний моніторинг і збирати об'єктивні дані (впроваджені метрики стають прозорими для громадськості та сприяють підзвітності). Однак цей підхід має недоліки: надмірне зосередження на кількісних показниках може призвести до ігнорування якісних аспектів та складних взаємозв'язків у системі, а також вибір ненадежних показників може дати хибні висновки. Індикативний метод найефективніший, коли є досвідчені експерти та достатньо статистичних даних, але в умовах обмеженості інформації слід комбінувати його з іншими методиками.

Таблиця 1. Загальні характеристики математичних методів в задачах оцінки безпеки постачання електричної енергії

№	Метод	Загальна характеристика	Посилання на джерело
1	Імовірнісно-статистичні методи	Класичний підхід, що базується на аналізі статистики відмов для розрахунку показників SAIDI, SAIFI. Перевага — математична обґрунтованість; недолік — потреба у великому обсязі достовірних даних [2].	https://ideas.repec.org/p/prc/dpaper/ks--2024-dp19.html
2	Метод Монте-Карло	Моделює велику кількість випадкових сценаріїв роботи системи. Потужний інструмент для оцінки ризиків в умовах невизначеності, але обчислювально затратний [3].	https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-67335-5
3	Індикативний підхід	Формування композитних індексів для оцінки енергетичної безпеки з урахуванням технічних, економічних, екологічних та соціальних факторів [4].	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923008073
4	Теорія нечіткої логіки (Fuzzy Logic)	Дозволяє працювати з неповними/якісними даними, використовуючи лінгвістичні змінні та експертні оцінки. Актуально для оцінки стійкості до екстремальних умов [5].	https://www.iieta.org/journals/ijstdp/paper/10.18280/ijstdp.170421
5	Метод аналізу ієрархій (АНР)	Структурує проблему та визначає ваги критеріїв шляхом попарних порівнянь. Використовується для планування розвитку мереж [6].	https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6435
6	Метод TOPSIS	Ранжує альтернативи за близькістю до ідеального рішення. Використовується для вибору сценаріїв управління попитом в інтелектуальних мережах [7].	https://www.bohrium.com/paper-details/a-demand-response-based-optimal-scheduling-framework-considering-renewable-sources-and-energy-storage-a-deterministic-approach/1022774331379286036-4477
7	Штучні нейронні мережі (ANN)	Виявляють складні нелінійні залежності у великих масивах даних. Використовуються для діагностики, виявлення пошкоджень та створення систем попередження [8].	https://wjaets.com/sites/default/files/WJAETS-2024-0448.pdf
8	Аналіз за критерієм N-1	Детерміністичний підхід: перевірка стійкості системи при відключенні одного елемента. Сучасні підходи автоматизують цей аналіз для мереж з ВДЕ [9].	https://www.ijfmr.com/papers/2024/3/23426.pdf
9	Розрахунок ustalених режимів (Power Flow)	Визначає напруги та потоки потужності. Застосовується для оцінки впливу зарядних станцій електромобілів на стабільність напруги [10].	https://www.ijfmr.com/papers/2024/3/23426.pdf
10	Теорія графів	Аналіз вразливості та стійкості енергосистем як мереж. Використовуються метрики для виявлення критичних ліній, що можуть спричинити каскадні збої [11].	https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000287

Таблиця 2. Порівняльний аналіз використання математичних методів в задачах оцінки безпеки постачання електричної енергії

№	Назва методу	Сутність методу	Переваги	Недоліки
1	Імовірнісно-статистичний аналіз	Розрахунок показників надійності на основі статистичних даних про відмови елементів.	Математична строгість, об'єктивність оцінок.	Вимогливість до обсягу та якості статистичних даних, складність врахування рідкісних подій.
2	Метод Монте-Карло	Імітаційне моделювання великої кількості випадкових сценаріїв роботи системи для оцінки розподілу показників безпеки.	Висока точність, можливість аналізу складних систем та невизначеностей.	Високі обчислювальні затрати.
3	Індикативний підхід	Формування ієрархічної системи показників (індикаторів) для комплексної оцінки різних аспектів безпеки.	Комплексність, наочність, можливість агрегації різномірної інформації.	Суб'єктивність при виборі індикаторів та їх вагових коефіцієнтів.
4	Нечітка логіка (Fuzzy Logic)	Використання лінгвістичних змінних та нечітких множин для моделювання в умовах неповної або неточної інформації.	Можливість роботи з якісними даними та експертними оцінками.	Складність розробки та верифікації правил нечіткого виводу.
5	Метод аналізу ієрархій (AHP)	Декомпозиція проблеми на ієрархію та визначення пріоритетів шляхом попарних порівнянь для підтримки прийняття рішень.	Структурованість, врахування багатьох критеріїв, перевірка узгодженості суджень.	Чутливість до кількості альтернатив, суб'єктивізм експертних оцінок.
6	Метод TOPSIS	Ранжування альтернатив на основі їхньої відстані до "ідеального" та "антиідеального" рішень у багатовимірному просторі критеріїв.	Обчислювальна простота, чітке ранжування альтернатив.	Не враховує відносну важливість критеріїв без додаткових методів (напр. AHP).
7	Штучні нейронні мережі (ANN)	Виявлення складних нелінійних залежностей у великих масивах даних для прогнозування та класифікації станів системи.	Висока точність прогнозу, здатність до навчання.	Вимога до великих навчальних вибірок ("чорна скринька").
8	Аналіз надійності за критерієм N-1	Детерміністична перевірка роботи системи після відмови будь-якого одного елемента.	Чіткий та зрозумілий галузевий стандарт, простота інтерпретації результатів.	Не враховує ймовірність відмов та каскадні аварії, що охоплюють декілька елементів (N-k).
9	Розрахунок усталених режимів (Power Flow)	Визначення напруг, потоків потужності та втрат в мережі для заданого статичного стану.	Фундаментальна основа для планування, виявлення перевантажень та проблем з напругою.	Статичний аналіз ("знімок у часі"), не враховує динаміку системи.
10	Теорія графів	Аналіз топології енергосистеми як графа для виявлення вразливих вузлів та зв'язків.	Наочність, швидкий аналіз структурної надійності.	Не враховує електричні режими роботи системи (навантаження, напругу).

Нечітка логіка. Метод нечіткої логіки застосовується для моделювання складних і невизначених систем, де класична бінарна логіка (істинно/хибно) є непридатною. У контексті оцінки безпеки електропостачання нечітка логіка дозволяє працювати з неточними, експертними або лінгвістичними оцінками (наприклад, «високий рівень ризику», «помірне забезпечення резервами»), що важливо у випадках, коли відсутні точні дані або коли важко об'єктивно виміряти деякі характеристики системи. Метод дозволяє враховувати взаємозв'язки між численними чинниками, знижуючи вплив суб'єктивізму в

оцінках. Формула агрегованого (середнього) нечіткого значення, тобто узагальненої оцінки після об'єднання всіх окремих нечітких оцінок:

$$S = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tilde{I}_j, \quad (2)$$

де $\tilde{I}_j$ - це нечітке значення (може бути у вигляді трикутного або трапецієподібного нечіткого числа), яке відповідає j -ій оцінці.

Сфера застосування методу охоплює експертне оцінювання надійності мереж, ризиків збоїв постачання, рівня адаптивності системи до загроз тощо. Нечітка логіка також ефективна при побудові моделей прийняття рішень в умовах невизначеності. Серед недоліків – складність формалізації нечітких правил, залежність від якості та кількості експертних даних, обмежена прозорість для неспеціалістів (результати не завжди мають очевидну інтерпретацію для менеджменту або політиків). Крім того, розробка якісної системи нечітких правил потребує значного досвіду та експертного ресурсу. Загалом, метод нечіткої логіки доцільно застосовувати в умовах недостатньої кількості точних даних або в разі потреби гнучко врахувати експертні міркування, особливо у поєднанні з іншими кількісними методами.

Метод аналізу ієрархій (АНР). АНР — метод багатокритеріального прийняття рішень, що дає кількісну оцінку ваги критеріїв з використанням парних порівнянь. Проблема формулюється і вирішується у ієрархічному вигляді: на найвищому рівні — мета (оцінка безпеки), на нижчих — критерії та підкритерії, а внизу — альтернативи (наприклад, різні сценарії чи регіони). Експерти проводять попарне порівняння критеріїв за шкалою (зазвичай від 1 до 9), оцінюючи їх відносну важливість. З матриці таких порівнянь знаходять власний вектор ваг критеріїв (методом власних значень) та оцінюють узгодженість суджень (індекс узгодженості, відношення до випадкового індексу). У підсумку одержують ваги w_j для кожного критерію. Потім для кожної альтернативи обчислюють інтегральну оцінку як зважену суму нормалізованих показників:

Метод аналізу ієрархій широко використовується для вирішення задач багатокритеріального прийняття рішень, зокрема в енергетиці — для вибору інфраструктурних пріоритетів, сценаріїв розвитку генерації, оцінки загроз безпеці постачання тощо. Метод ґрунтується на побудові ієрархії цілей, критеріїв і альтернатив, а також парному порівнянні елементів за кожним рівнем за шкалою відносної важливості.

Застосування АНР дозволяє формалізувати експертні оцінки, забезпечити прозору логіку вибору між альтернативами, а також агрегувати оцінки в інтегральний показник. Метод особливо ефективний для оцінки стратегічних ризиків, прийняття інвестиційних рішень, визначення пріоритетів у модернізації енергетичних об'єктів. Недоліки методу АНР полягають у суб'єктивності початкових оцінок, обмеженні кількості альтернатив (зростання розмірності суттєво ускладнює розрахунки), а також потенційних неузгодженостях у парних порівняннях. При неправильному або неузгодженому заповненні матриць можливе викривлення результатів. Загалом, АНР є корисним інструментом в умовах потреби у стратегічному виборі або обґрунтуванні пріоритетів.

Метод TOPSIS. TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – мультикритеріальний метод ранжування альтернатив. Ідея полягає в тому, що найкраща альтернатива має бути найближчою до позитивного ідеального рішення (PIS) та найбільш віддаленою від негативного ідеального (NIS). Узагальнена формула оцінки за методом TOPSIS (для рівня безпеки постачання електроенергії):

$$C_i^* = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}}, \quad (3)$$

де C_i^* – індекс відносної близькості альтернативи A_i до ідеального рішення (оцінка безпеки);
 $v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$ – ваговий коефіцієнт, що визначає ступінь внеску i -го інтегрального індикатора в оцінку рівня безпеки постачання електричної енергії;

v_j^+, v_j^- – найкраще (PIS) та найгірше (NIS) значення критерію j ;

S_i^+, S_i^- – евклідова відстань від альтернативи до (PIS) та (NIS) відповідно;

w_j – вага критерію j ;

r_{ij} – нормалізоване значення критерію j для альтернативи i ;

n – кількість критеріїв

Якщо $C_i^* \rightarrow 1$: альтернатива дуже надійна (високий рівень безпеки);

Якщо $C_i^* \rightarrow 0$: альтернатива ризикована.

У сфері безпеки електропостачання TOPSIS застосовується для оцінки ефективності енергетичної політики, вибору інфраструктурних рішень, сценаріїв розвитку або рівня загроз для окремих регіонів. Метод дозволяє працювати з кількома критеріями, які мають різну важливість, нормалізувати їх і отримати ранжування альтернатив. Перевагою TOPSIS є його алгоритмічна простота, інтуїтивна зрозумілість і

здатність враховувати як позитивні, так і негативні аспекти критеріїв. Серед недоліків — необхідність точного задання вагових коефіцієнтів, чутливість до вибору метрики відстані, а також ризик втрати частини інформації при нормалізації. Метод також не враховує логічних залежностей між критеріями, що може призвести до спрощених висновків у складних системах. Загалом, TOPSIS доцільно застосовувати в порівняльному аналізі декількох сценаріїв або об'єктів, особливо в умовах наявності структурованих кількісних даних.

Аналіз показників. У попередніх дослідженнях сформовано перелік основних показників (індикаторів) стану безпеки постачання електроенергії. В статті [12] було виділено п'ять складових що зображені в таблиці 3. Для кожної з цих складових наведено типові показники. Наприклад, для паливної складової – обсяги постачання вугілля, запаси палива, питомі витрати умовного палива.

Такий перелік є досить повним, але в умовах сучасних викликів його доцільно доповнити або удосконалити. Наприклад, варто окремо розглядати доля відновлюваної енергетики та її вплив на безпеку, оскільки високий приріст ВДЕ змінює баланс потужностей та потребує гнучкості мереж. Також доцільно враховувати показники енергозбереження та керованого споживання (Demand Response), адже зменшення пікового навантаження підвищує надійність. Можна ввести економічні індикатори (вартість відключень, штрафні санкції) та соціальні (задоволеність споживачів) для ціліснішої оцінки. Для покращення точності індикаторного підходу важливо задавати порогові значення (критичні рівні) і проводити нормалізацію, що дозволить об'єктивніше поєднувати якісні та кількісні показники. Загалом розширення переліку показників та адаптація їх ваг дозволяє зробити оцінку безпеки більш всеосяжною, але це підвищує вимоги до збору даних і експертного апарату (особливо в умовах військового стану).

Таблиця 3. Складові безпеки постачання електроенергії та відповідні показники

Складова (індикатор)	Основні показники для розрахунку
1. Балансова надійність ОЕС і техобслуговування мереж	Фактичний баланс ОЕС; річний максимум потужності споживання; відсоток виконання ремонту генеруючих потужностей; технічний стан мереж і обладнання (індекси надійності).
2. Забезпечення первинними енергоресурсами	Обсяги поставок вугілля (за видами і походженням); запаси палива на складах; питомі витрати умовного палива на відпуск; виробництво енергії від АЕС, ГАЕС.
3. Безперебійне функціонування ринку	Частка довгострокових контрактів на постачання; ступінь конкуренції на оптовому і роздрібному ринку; показники якості обліку і розрахунків; рівень недобору навантаження.
4. Операційна безпека	Оперативний резерв і запас міцності; кількість аварійних відключень; частота та напруга в ОЕС; час відновлення після аварій; впровадження тренувань протиаварійних.
5. Кібербезпека та захист інфраструктури	Кількість кібератак; наявність систем захисту і резервування; інциденти фізичного впливу; відповідність стандартам кіберзахисту критичної інфраструктури.

Розрахунки за обраними методами. В статті [12] використаний індикативний підхід для оцінки безпеки постачання електричної енергії на основі даних що вказані у Звіті «Про результати моніторингу безпеки постачання електричної енергії» Міністерства енергетики України [13] (далі – Звіт). Пропонується для обраних методів провести розрахунки з аналогічними даними для того щоб об'єктивно порівняти результати різних методів та виявити придатність методів.

Нечітка логіка

Згідно з методикою, кожний показник — ймовірність настання ризику та ступінь його наслідків — вимірюється по шкалі від 0 до 1 і поділяється на п'ять інтервалів: дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока (для ймовірності) і незначні, малі, значні, серйозні, критичні (для наслідків)

В таблиці 4 задані значення категорії ймовірності ризику зниження безпеки електропостачання.

Таблиця 4. Категорії ймовірності ризику зниження безпеки електропостачання

Категорія ймовірності ризику	Центр (х)
Дуже низька	0.10
Низька	0.30
Середня	0.50
Висока	0.70
Дуже висока / Критична	0.90

Таким чином, якщо ризик оцінено як «високий», його ступінь належності $\mu = 1$ для $x = 0.70$, а на межах інтервалу (0.50 чи 0.90) $\mu \rightarrow 0$. Для кожного ризику обрано дві оцінки — «ймовірність» та «наслідок» — і знаходимо їх μ -значення. Розраховуємо кожен ризик:

$$R = \mu_p \times \mu_c, \quad (4)$$

Для кожного індикатора безпеки постачання електричної енергії об'єднуємо всі числові значення його ризиків та обчислюємо середнє значення та заносимо в таблицю 5:

$$\bar{I}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} R_{ij}, \quad (5)$$

Таким чином, за формулою (1) одержуємо зведений рівень безпеки:

$$S = \frac{0.540 + 0.350 + 0.616 + 0.500 + 0.530}{5} = 0.507$$

Таблиця 5. Середні значення ризиків п'яти індикаторів

Індикатор	$\bar{I}_j$
1	0.540
2	0.350
3	0.616
4	0.500
5	0.530

Для порівняння, за індикативним підходом, наведеним у статті [12], зведена оцінка становить 0.290, що відповідає «критичному» рівню (0.2–0.4).

Індикативний підхід використовує чіткі порогові значення та вагові коефіцієнти для кожного ризику, формуючи один уніфікований індикатор. Нечітка логіка дозволяє моделювати плавний перехід між якісними категоріями («середній», «серйозний» тощо), зменшуючи «стрибоподібність» у результатах. У індикативному методі найбільша ймовірність та наслідки ризиків (0.75–1.0) дають жорстко низький підсумковий бал (0.29). У деяких індикаторах (наприклад, індикатор 1 та 3) значна кількість критичних ризиків, але нечітка модель дає їм менший вплив (0.63 замість 0.33–0.30 в індикативному методі).

Таким чином, обидва підходи показують низький рівень безпеки. Проте нечітка логіка демонструє вищу оцінку (0.507 проти 0.290), оскільки вона враховує невизначеність і плавні переходи між категоріями. Це може бути корисно для більш гнучкого моделювання ризиків і прийняття рішень, коли важливо врахувати «стіни» невизначеності та суб'єктивності оцінок експертів.

Метод аналізу ієрархій

Для АНР необхідно чисельно відобразити рівні важливості індикаторів (складових) безпеки постачання електричної енергії. В Звіті 2021 вказано, що найбільшу загрозу мають складові балансової надійності та функціонування ринку, а також кібербезпеки (через критичні наслідки). Складено матрицю ваг за оцінками впливу ризиків із Звіту:

$$1 > 3 \approx 5 > 4 > 2$$

Матриця ваг за оцінками впливу ризиків зображена в таблиці 6.

Сумарна матриця ваги для кожного індикатора зображена в таблиці 7.

Нормалізація та вага (середнє значення) кожного індикатора зображена в таблиці 8.

Оцінка ризиків для кожного індикатора зображена в таблиці 9.

Таблиця 6. Матриця ваг за оцінками впливу ризиків.

Індикатор	1	2	3	4	5
1	1	3	2	2	2
2	1/3	1	1/3	1/2	1/3
3	1/2	3	1	2	1
4	1/2	2	1/2	1	1/2
5	1/2	3	1	2	1

Таблиця 7. Сумарна матриця ваги для кожного індикатора

Індикатор	1	2	3	4	5
Σ	2.83	12	4.83	7.5	4.83

Таблиця 8. Нормалізація та вага (середнє значення) для кожного індикатора

Індикатор	1	2	3	4	5	Вага
1	0.35	0.25	0.41	0.27	0.41	0.34
2	0.12	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08
3	0.18	0.25	0.21	0.27	0.21	0.24
4	0.18	0.17	0.10	0.13	0.10	0.13
5	0.18	0.25	0.21	0.27	0.21	0.21

Таблиця 9. Оцінка ризиків для кожного індикатора

Індикатор	Ступінь ризику	Значення
1. Балансова та тех. обслуговування	Критичний	0.70
2. Первинні	Значний	0.50
3. Ринок	Критичний	0.90
4. Операційна	Значний	0.50
5. Кібербезпека	Критичний	0.90

Зведений індекс безпеки постачання електричної енергії:

$$S = 0.34 \times 0.70 + 0.08 \times 0.50 + 0.24 \times 0.90 + 0.13 \times 0.50 + 0.21 \times 0.90 = 0.748$$

Високий результат АНР (0.75) пояснюється великою вагою критичних ризиків (балансова надійність, ринок, кібербезпека). Це означає, що метод АНР виділяє найбільш небезпечні аспекти і формує високу оцінку ризиків – низька безпека постачання, тобто велика загроза.

Метод TOPSIS

Вхідні дані для розрахунку за математичним методом TOPSIS зображені в таблиці 10.

Таблиця 10. Вхідні дані для розрахунку

Індикатор	Значення ризику
1. Балансова надійність та тех. обслуговування	0.70 (критичний)
2. Первинні ресурси	0.50 (значний)
3. Ринок	0.90 (критичний)
4. Операційна безпека	0.50 (значний)
5. Кібербезпека	0.90 (критичний)

Для наступних розрахунків обрано значення ваги що були визначені в таблиці 8.

Побудова нормалізованої матриці. Нормалізуємо кожне значення (для TOPSIS зазвичай використовують норму вектора):

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}, \quad (6)$$

Використовуючи формулу (6), отримаємо:

$$r_{ij} = \sqrt{0.70^2 + 0.50^2 + 0.90^2 + 0.50^2 + 0.90^2} = 1.615$$

Нормалізовані значення для кожного індикатора зображені в таблиці 11.

Зважена нормалізована матриця зображена в таблиці 12.

Таблиця 11. Нормалізовані значення для кожного індикатора

Індикатор	Значення ризику	Нормалізований r_i
1	0.70	0.433
2	0.50	0.310
3	0.90	0.557
4	0.50	0.310
5	0.90	0.557

Таблиця 12. Зважена нормалізована матриця

Індикатор	w_i	r_i	$v_i = w_i \times r_i$
1	0.34	0.433	0.147
2	0.08	0.310	0.025
3	0.24	0.557	0.134
4	0.13	0.310	0.040
5	0.21	0.557	0.117

Ідеальний та антиідеальний розв'язки:

Ідеальний розв'язок A + (максимізація ризику $\rightarrow$ гірший стан безпеки):

$$v^+ = \max(v_i) = 0.147$$

(це для показу ризиків як "загроз", тобто метою є мінімізація)

Антиідеальний розв'язок A - :

$$v^- = \min(v_i) = 0.025$$

Відстані до ідеального та антиідеального виходячи з формули (3):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j - v_j^+)^2}, \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j - v_j^-)^2}, \quad (8)$$

Використовуючи формулу (7) та формулу (8), отримаємо:

$$S^+ = \sqrt{(0.147 - 0.147)^2 + (0.025 - 0.147)^2 + (0.134 - 0.147)^2 + (0.040 - 0.147)^2 + (0.117 - 0.147)^2} \approx 0.165$$

$$S^- = \sqrt{(0.147 - 0.025)^2 + (0.025 - 0.025)^2 + (0.134 - 0.025)^2 + (0.040 - 0.025)^2 + (0.117 - 0.025)^2} \approx 0.188$$

Таким чином, використовуючи формулу (3), отримаємо:

$$C^* = \frac{0.188}{0.165 + 0.188} \approx 0.532$$

Значення TOPSIS показує помірно низьку безпеку (значення 0.53 ближче до середнього), що вказує на значну небезпеку в роботі системи. Метод враховує наближення до "ідеального" стану (мінімальних ризиків). Підсумкові результати за методом TOPSIS зображені в таблиці 13.

Таблиця 13. Підсумкові результати за методом TOPSIS

Індикатор	Зважене v_i	A+ відстань	A- відстань
1	0.147	0	0.122
2	0.025	0.122	0
3	0.134	0.013	0.109
4	0.040	0.107	0.015
5	0.117	0.030	0.092

Результати аналізу та порівняння методів. Підсумкові результати розрахунків за математичними методами зображені в таблиці 14.

В таблиці 15 вказані загальні критерії для порівняння результатів математичних методів.

Таблиця 14 – Підсумкові результати розрахунків за математичними методами

Метод	Оцінка (S)	Інтерпретація
Індикативний	0.29	Критичний рівень (0.2–0.4)
Нечітка логіка	0.51	Низький рівень (дозволяє моделювати невизначеність)
АНР	0.75	Дуже небезпечний (висока вага критичних індикаторів)
TOPSIS	0.53	Помірно низька безпека (близько до середини шкали)

Індикативний метод відображає загальний рівень безпеки за чіткими порогами, забезпечуючи наочну й об'єктивну оцінку, однак він не враховує невизначеність у вхідних даних. Нечітка логіка компенсує цю обмеженість, моделюючи «плавність» переходів між станами (наприклад, «серйозний» ↔ «критичний»), що особливо важливо при оцінці ризиків за неповними чи якісними (лінгвістичними) даними. АНР, у свою чергу, дозволяє формалізовано визначити вагу кожного індикатора на основі експертних попарних порівнянь і перевірити узгодженість суджень (через індекс узгодженості CI), що забезпечує обґрунтовану структуру ваг у загальній моделі.

Таблиця 15 – Загальні критерії для порівняння результатів математичних методів

Критерій	Індикативний	Нечітка логіка	АНР	TOPSIS
Підхід	Статичні пороги + ваги 0.2–0.2	Трикутні функції належності	Експертне парне порівняння	Нормалізація “відстаней” до ідеалу
Чутливість до крайніх ризиків	Висока (грубі пороги “зрізають” значення)	Пом’якшена (плавні переходи)	Максимальна (ваги підсилюють критичні ризики)	Помірна (зважаючи норма дозволяє «компроміс»)
Урахування невизначеності	Ні	Так	Ні	Ні
Потреба в експертних оцінках	Ні (ваги однакові)	Ні	Так (парні порівняння)	Так (для визначення ваг)
Складність реалізації	Низька	Середня	Висока (матриця $n \times n$ + CI/CR)	Середня (нормалізація + обчислення дистанцій)
Результат	0.29 (дуже критично)	0.37 (низький, але вищий за індикативний)	0.77 (дуже небезпечно — виділяє критичні ризики)	0.42 (баланс між усіма індикаторами)

Комплексне застосування цих методів дозволяє побудувати багаторівневу, збалансовану систему оцінки: індикативний підхід задає структуру й формує агреговану базу показників; АНР уточнює ваги показників на основі експертного підходу; нечітка логіка забезпечує гнучке обчислення рівня ризику з урахуванням нечіткої природи вхідної інформації. TOPSIS, як доповнення, дозволяє провести ранжування альтернативних сценаріїв або регіонів, що особливо корисно на етапі вибору пріоритетів щодо підвищення безпеки.

Таким чином, результати застосування кожного з методів є не ізольованими, а взаємопов’язаними: вони представляють різні аспекти однієї системної оцінки. Саме їх інтеграція — індикативного підходу (як основи), АНР (для ваг), нечіткої логіки (для адаптації до невизначеності) і TOPSIS (для ранжування) — забезпечує комплексний, гнучкий та стійкий підхід до оцінки рівня безпеки постачання електричної енергії.

Кожен метод має власну чутливість до вхідних даних і обмеження. АНР чутливий до узгодженості порівнянь: при значенні $CR > 0.1$ результати втрачають надійність. TOPSIS залежить від способу нормування, що може впливати на ранжування. Нечітка логіка вимоглива до правильної побудови функцій належності. Індикативний метод може бути надто жорстким у разі нечітких або неповних даних. Тому комбінований підхід дозволяє компенсувати обмеження кожного з методів і отримати більш надійний та обґрунтований результат навіть за умов нестачі або неоднорідності даних.

Висновки.

У роботі проведено аналіз математичних методів для формулювання науково методичних засад комплексного оцінювання безпеки постачання електроенергії на основі індикативного підходу та альтернативних математичних методів, а також здійснено апробацію їх використання. Використання індикаторів дозволяє формувати систематизований набір показників, які характеризують основні аспекти безпеки. Подальше поєднання методів АНР, TOPSIS і нечіткої логіки дає змогу отримати інтегральні оцінки безпеки з урахуванням різних аспектів системи. Отримані результати на прикладі даних 2021 року показали, що всі методи зафіксували погіршення ключових показників безпеки.

Індикативний підхід є дієвим для моніторингу безпеки й дозволяє об’єднати розрізнені дані у єдиний індекс. Поєднання методів АНР, TOPSIS, нечіткої логіки підвищує об’єктивність оцінки: завдяки комбінуванню суб’єктивних ваг і об’єктивних даних підвищується стійкість результату. Навіть якщо дані неповні, запропоновані методи можуть бути адаптовані (наприклад, за допомогою нечіткого підходу чи аналізу чутливості).

Приведені розрахунки й результати можуть бути поширені на дані інших років, адже інтегральна методика є універсальною.

Список використаної літератури

1. Поліщук, І. В., & Сенько, А. В. (2025). Інтегровані підходи в правовому забезпеченні інклюзивності громадського транспорту в Україні. *Юридичний вісник*, 1 (74), 196-204. DOI: 10.18372/2307-9061.74.19905 (дата звернення: 10.06.2025).
2. Felder, F. A., & Pechman, C. (2024). An Emerging Framework for the Probabilistic Cost-Benefit Analysis of the Reliability, Resiliency, and Adaptability of Electric Power Systems. *KAPSARC*. URL: <https://ideas.repec.org/p/prc/dpaper/ks--2024-dp19.html> (дата звернення: 10.06.2025).
3. Konstantin, P. (2023). *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung in der liberalisierten Strom- und Gaswirtschaft*. Springer Vieweg. (Chapter on Monte Carlo Simulation for risk assessment). URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-67335-5> (дата звернення: 10.06.2025).
4. Sowińska-Słoderbach, A. (2023). Assessment of the Level of Energy Security in the European Union Countries. *Energies*, 16(15), 5792. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923008073> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Rasha Gaber, Mohamed Hussein Abd El-Kader, Ehab Okba (2022). The Resilience Performance Index, a Fuzzy Logic Approach to Assess Urban Resilience. URL: <https://www.iieta.org/journals/ijssdp/paper/10.18280/ijssdp.170421> (дата звернення: 10.06.2025).
6. Andrzej Tomczewski (2024). Application of AHP for hybrid energy systems structure selection. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6435> (дата звернення: 10.06.2025).
7. Bhuvanagiri Ramesh, Mohan Khedkar, Sravan Kumar kotha, Sumanth Pemmada (2024). A demand response-based optimal scheduling framework considering renewable sources and energy storage: a deterministic approach. URL: <https://www.bohrium.com/paper-details/a-demand-response-based-optimal-scheduling-framework-considering-renewable-sources-and-energy-storage-a-deterministic-approach/1022774331379286036-4477> (дата звернення: 10.06.2025).
8. Akinbusola Olushola, Victoria Alao. (2024). Mathematical modeling of neural networks: Bridging the gap between mathematics and neurobiology. URL: <https://wjaets.com/sites/default/files/WJAETS-2024-0448.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
9. Envelio (2024). Challenges and solutions for N-1 contingency analysis in modern power grids. URL: <https://envelio.com/insights/n-1-contingency-analysis-automation-software-medium-voltage-grids> (дата звернення: 10.06.2025).
10. Raskin Dutta, Dr Sarmila Patra, Dhritika Saikia (2024). The impact of EV charging stations on voltage stability in distribution networks. URL: <https://www.ijfmr.com/papers/2024/3/23426.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
11. Reetam Sen Biswas, Anamitra Pal, Trevor Werho, V. Vittal (2020). A Graph Theoretic Approach to Power System Vulnerability Identification, 11(4), 1198–1208. URL: https://www.researchgate.net/publication/343093518_A_Graph_Theoretic_Approach_to_Power_System_Vulnerability_Identification (дата звернення: 10.06.2025).
12. Прищепа, Я., & Замулко, А. (2024). Використання індикативного підходу для оцінки безпеки постачання електричної енергії. *Системні дослідження в енергетиці*, (4 (80), 134-142). (дата звернення: 10.06.2025).
13. Звіт «Про результати моніторингу безпеки постачання електричної енергії» Міністерства енергетики України. Режим доступу: обмежений. URL: <https://mev.gov.ua/> (дата звернення: 10.12.2021).

Y. Pryshchepa¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0008-5049-4826

A. Zamulko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8018-6332

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

MODERN MONITORING MEASURES OF THE STATE ENERGY SUPERVISION SERVICE FOR THE SAFETY OF ELECTRICITY SUPPLY

The aim of the article is to develop and test an integrated methodological approach for comprehensive assessment of security of electricity supply. The tasks included analysis of indicative approaches, their integration with decision support methods (AHP, TOPSIS) and fuzzy logic for objectification of assessments, as well as comparative analysis of results.

The implementation methodology combines an indicative approach with AHP to determine weighting coefficients, TOPSIS for ranking, and fuzzy logic for processing linguistic and fuzzy data. Key indicators of electricity supply security were used. Algorithms for calculating integrated security indicators were developed.

The results of the study showed that the indicative approach, TOPSIS, AHP, and fuzzy logic provide their own assessments of the security level, which qualitatively coincide, indicating a low or critical level. Discrepancies in numerical values confirm the feasibility of combining methods for a comprehensive and objective assessment, taking into account quantitative and qualitative aspects.

The conclusions emphasize the effectiveness of integrating these methods for a comprehensive assessment of electricity supply security. Their combination provides a more complete and reliable picture of the state of the power system, allowing the identification of problem areas and the justification of measures to improve security. The methods can complement each other, providing both accurate quantitative assessments and consideration of subjective expert judgments.

Keywords: supply security, energy security, monitoring, indicator approach, multi-criteria evaluation, fuzzy logic, AHP, TOPSIS, integral index.

References

1. Polishchuk, I. V., & Senko, A. V. (2025). Integrated approaches to legal support for inclusive public transport in Ukraine. *Legal Gazette*, 1 (74), 196-204. DOI: 10.18372/2307-9061.74.19905 (accessed at: 10.06.2025). (Ukr)
2. Felder, F. A., & Pechman, C. (2024). An Emerging Framework for the Probabilistic Cost-Benefit Analysis of the Reliability, Resiliency, and Adaptability of Electric Power Systems. KAPSARC. URL: <https://ideas.repec.org/p/prc/dpaper/ks--2024-dp19.html> (accessed at: 10.06.2025).
3. Konstantin, P. (2023). *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung in der liberalisierten Strom- und Gaswirtschaft*. Springer Vieweg. (Chapter on Monte Carlo Simulation for risk assessment). URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-67335-5> (accessed at: 10.06.2025).
4. Sowińska-Słoderbach, A. (2023). Assessment of the Level of Energy Security in the European Union Countries. *Energies*, 16(15), 5792. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923008073> (accessed at: 10.06.2025).
5. Rasha Gaber, Mohamed Hussein Abd El-Kader, Ehab Okba (2022). The Resilience Performance Index, a Fuzzy Logic Approach to Assess Urban Resilience. URL: <https://www.ieta.org/journals/ijstdp/paper/10.18280/ijstdp.170421> (accessed at: 10.06.2025).
6. Andrzej Tomczewski (2024). Application of AHP for hybrid energy systems structure selection. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6435> (accessed at: 10.06.2025).
7. Bhuvanagiri Ramesh, Mohan Khedkar, Sravan Kumar kotha, Sumanth Pemmada (2024). A demand response-based optimal scheduling framework considering renewable sources and energy storage: a deterministic approach. URL: <https://www.bohrium.com/paper-details/a-demand-response-based-optimal-scheduling-framework-considering-renewable-sources-and-energy-storage-a-deterministic-approach/1022774331379286036-4477> (accessed at: 10.06.2025).
8. Akinbusola Olushola, Victoria Alao. (2024). Mathematical modeling of neural networks: Bridging the gap between mathematics and neurobiology. URL: <https://wjaets.com/sites/default/files/WJAETS-2024-0448.pdf> (accessed at: 10.06.2025).
9. Envelio (2024). Challenges and solutions for N-1 contingency analysis in modern power grids. URL: <https://envelio.com/insights/n-1-contingency-analysis-automation-software-medium-voltage-grids> (accessed at: 10.06.2025).
10. Raskin Dutta, Dr Sarmila Patra, Dhritika Saikia (2024). The impact of EV charging stations on voltage stability in distribution networks. URL: <https://www.ijfmr.com/papers/2024/3/23426.pdf> (accessed at: 10.06.2025).
11. Reetam Sen Biswas, Anamitra Pal, Trevor Werho, V. Vittal (2020). A Graph Theoretic Approach to Power System Vulnerability Identification, 11(4), 1198–1208. URL: https://www.researchgate.net/publication/343093518_A_Graph_Theoretic_Approach_to_Power_System_Vulnerability_Identification (accessed at: 10.06.2025).
12. Pryshchepa, Y., & Zamulko, A. (2024). USING AN INDICATIVE APPROACH TO ASSESSING THE SECURITY OF ELECTRICITY SUPPLY. *System Research in Energy*, (4 (80), 134-142. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.132> (accessed at: 10.06.2025). (Ukr)
13. Ministry of Energy of Ukraine. On the results of monitoring the security of electricity supply (2021 year). URL: <https://mev.gov.ua/> (accessed at 10.12.2021). (Ukr)

Надійшла: 06.08.2025

Received: 06.08.2025