

Марчук Володимир Валерійович
аспірант кафедри бізнес-економіки та підприємництва,
Київський національний економічний університет
імені Вадима Гетьмана
м. Київ, Україна
e-mail: 4marchuk@gmail.com
ORCID 0009-0001-1307-0572

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ РІШЕНЬ ЩОДО МАТЕРІАЛЬНИХ АКТИВІВ ПІДПРИЄМСТВА

Marchuk Volodymyr V.
Postgraduate student of the Department of Business Economics and Entrepreneurship,
Kyiv National Economic University
Vadym Hetman
m. Kyiv, Ukraine
e-mail: 4marchuk@gmail.com
ORCID 0009-0001-1307-0572

USING FUZZY LOGIC MODELS FOR MAKING INVESTMENT DECISIONS ON TANGIBLE ASSETS OF AN ENTERPRISE

Анотація. У статті розглянуто застосування моделей з нечіткою логікою для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень про матеріальні активи теплоелектростанцій (ТЕС) в Україні. З огляду на складний та динамічний стан енергетичної системи країни, а також необхідність модернізації застарілого обладнання планування інвестицій у капітальні ремонти та модернізацію стає важливою складовою управлінських процесів. У зв'язку з цим використання традиційних методів планування не завжди є ефективним через наявність великої кількості невизначених або нечітких факторів, що впливають на прийняття рішень, таких як економічні коливання, зміни у законодавстві, екологічні вимоги та технологічні інновації. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є застосування моделей нечіткої логіки, які дозволяють обробляти нечітку та неповну інформацію, що виникає в умовах нестабільності. Нечітка логіка дає можливість оцінювати ризики, витрати та вигоди інвестиційних рішень, коли точні дані недоступні або неповні. Такий підхід дозволяє здійснювати гнучке управління капітальними ремонтами, модернізацією та заміною обладнання з урахуванням непередбачуваних змін у зовнішньому середовищі.

У статті проаналізовано специфічні аспекти функціонування ТЕС в Україні, зокрема роль маневрової генерації та її вплив на баланс попиту та пропозиції енергії. Оскільки ТЕС мають здатність оперативно змінювати потужність (маневрені потужності), їх участь у процесі регулювання енергетичної мережі надзвичайно важлива для забезпечення стабільної роботи енергетичної системи.

Застосування моделей нечіткої логіки в процесі інвестиційного планування дає змогу не лише знизити рівень ризиків, а й оптимізувати витрати на модернізацію ТЕС, що є важливим етапом у забезпеченні стабільного енергопостачання в Україні.

Розроблені рекомендації можуть бути використані для покращення управління енергетичними підприємствами та прийняття більш обґрунтованих рішень у сфері капітальних ремонтів.

Ключові слова: нечітка логіка, інвестиційні рішення, теплоелектростанція, капітальний ремонт, енергетична система.

Abstract. The research investigates the use of fuzzy logic models to make informed investment decisions on material assets at thermal power plants (TPPs) in Ukraine. Given the complexity and dynamic nature of the country's energy system, as well as the necessity to replace outdated equipment, investment planning for capital repairs and modernization has become an essential component of management operations. In this regard, traditional planning methods are not always effective due to the presence of multiple unpredictable or ambiguous aspects influencing decision-making, such as economic fluctuations, legislative changes, environmental restrictions, and technology developments.

One option to tackling this issue is to use fuzzy logic models, which allow for the processing of unclear and partial information that arises during times of instability. Fuzzy logic allows for the assessment of risks, costs, and benefits of investment decisions when precise data is unavailable or inadequate. This strategy enables flexible management of capital repairs, modernization, and equipment replacement while accounting for unanticipated changes in the external environment.

The article also examines specific features of TPP operation in Ukraine, specifically the role of movable generation and its impact on the energy supply-demand balance. TPPs' ability to quickly modify output makes their participation in regulating the energy grid critical for ensuring the energy system's stability. The application of fuzzy logic models in investment planning not only reduces risk levels but also optimizes modernization costs for TPPs, which is an essential step in ensuring stable energy supply in Ukraine. The recommendations developed can be used to improve the management of energy enterprises and make more informed decisions in the field of capital repairs.

Keywords: fuzzy logic, investment decisions, thermal power plant, capital repairs, energy system.

JEL codes: C13, C50, G31.

Постановка проблеми. Енергетичний сектор України перебуває в критичному стані й потребує глибоких трансформацій, зумовлених військовою агресією РФ, зношенням основних фондів, зокрема обладнання теплоелектростанцій, підвищенням екологічних вимог Європейського Союзу та динамічними змінами на ринку енергетичних ресурсів [1]. Проблема забезпечення стабільності функціонування ТЕС вимагає прийняття своєчасних і обґрунтованих інвестиційних рішень щодо проведення капітальних ремонтів і модернізації матеріальних активів. В умовах високої невизначеності та непередбачуваності зовнішніх чинників традиційні методи планування та оцінки інвестицій виявляються недостатньо ефективними.

В цих обставинах перспективним інструментом підтримки процесів прийняття управлінських рішень є використання моделей нечіткої логіки (fuzzy logic), які дозволяють враховувати нечітку, неповну або непередбачувану інформацію. Цей підхід підвищує гнучкість та точність оцінки інвестиційних проєктів, адаптуючи їх до мінливих умов ринку.

Ключовим аспектом дослідження є розробка та апробація моделей нечіткої логіки для обґрунтованого прийняття інвестиційних рішень щодо проведення капітальних ремонтів матеріальних активів ТЕС в Україні.

У межах дослідження передбачається вирішення таких завдань:

1. Аналіз технічного стану основних матеріальних активів ТЕС для визначення пріоритетних об'єктів капітального ремонту або модернізації.
2. Визначення ключових факторів, що впливають на прийняття рішень щодо капітальних ремонтів, зокрема економічних, технічних, безпекових і операційних аспектів.

3. Розробка моделі нечіткої логіки для аналізу інвестиційних рішень з урахуванням комплексного набору факторів.

4. Апробація запропонованої моделі на конкретних прикладах ТЕС в Україні для обґрунтування доцільності проведення капітального ремонту або модернізації.

5. Аналіз отриманих результатів і формування практичних рекомендацій для підвищення ефективності управління інвестиціями в матеріальні активи ТЕС.

Очікується, що застосування розробленої моделі дозволить пришвидшити прийняття управлінських рішень, підвищити ефективність планування капітальних ремонтів теплоелектростанцій та оптимізувати процеси модернізації в умовах невизначеності. Це сприятиме зміцненню надійності енергопостачання, зменшенню ризику перебоїв, підвищенню конкурентоспроможності енергетичних підприємств та їх відповідності сучасним екологічним стандартам.

Аналіз досліджень і публікацій. Тема планування інвестиційних рішень у сфері енергетики на основі моделей нечіткої логіки привертає все більшу увагу науковців та практиків у зв'язку з необхідністю врахування невизначеності та складності управлінських процесів. Сучасні дослідження висвітлюють ефективність застосування математичних моделей для прийняття рішень щодо капітальних ремонтів, модернізації обладнання та оптимізації управління виробничими процесами на підприємствах енергетичного сектору.

Важливий внесок у розвиток теорії нечіткої логіки зробив Лотфі Заде (Lotfi A. Zadeh) [2], який вперше запропонував концепцію нечітких множин. Згодом ця концепція знайшла широке застосування в різних сферах, зокрема в енергетиці. Працюючи над розвитком нечітких моделей управління, значний внесок зробили Є. Мамдані (Ebrahim Mamdani) [3] та С. Ассіліан (Sedrak Assilian) [4], чії роботи стали основою для застосування нечіткої логіки у виробничих системах. Наукову думку в цій галузі також розвиває професор А. В. Матвійчук у низці публікацій [14, 15, 16].

У контексті енергетичного сектору заслуговують на увагу дослідження, присвячені оптимізації управлінських процесів на теплових електростанціях. Автори цих робіт звертають увагу на розробку моделей прогнозування ефективності роботи ТЕС з використанням нечіткої логіки для прийняття стратегічних рішень.

У таких дослідженнях розглядаються питання управління режимами генерації, оцінки зношеності обладнання та планування капітальних ремонтів:

Б. І. Котов та В. О. Грищенко у роботі «Нечітка автоматична система керування охолоджувачем повітря» розглядають застосування нечіткої логіки для автоматизації управління охолоджувачами повітря на ТЕС [17];

О. В. Остапчук, Р. В. Вожаков та М. П. Болотний у навчальному посібнику «Автоматизовані системи управління та оптимізація режимів електричних станцій» розглядають питання автоматизації та оптимізації режимів роботи електростанцій, включаючи ТЕС, з використанням сучасних методів управління [18].

Українські науковці активно досліджують питання оптимізації функціонування енергетичних підприємств. У їхніх працях висвітлено важливі проблеми модернізації теплоелектростанцій, оцінки технічного стану обладнання та розробки інвестиційних стратегій для забезпечення стабільного енергопостачання. Однак більшість таких досліджень базуються на традиційних методах аналізу, які не враховують високої динамічності та невизначеності зовнішніх факторів.

Методика дослідження. Розробка нечіткої моделі для оцінки та прийняття інвестиційних рішень здійснюється у кілька ключових етапів. Перший етап включає визначення критеріїв оцінки інвестиційної привабливості активів, які враховують технічні та економічні аспекти, а також якісні фактори, такі як стратегічні цілі підприємства. Другий етап передбачає побудову нечіткої регресійної моделі, що дозволяє оцінити залежність результатів інвестиційних рішень від змінних, зокрема, технічного стану обладнання, змін в екологічних вимогах, цінах на енергоносії та інших економічних умовах. Третій етап полягає в інтеграції нечітких висновків моделі в конкретні числові результати, що можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень щодо капітальних ремонтів та модернізації активів. Кожен з етапів спрямований на забезпечення ефективної роботи системи, що враховує як кількісні, так і якісні фактори, а також здатна адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі.

1. Визначення критеріїв. На першому етапі відбувається ідентифікація основних параметрів, що впливають на ухвалення інвестиційних рішень. Це можуть бути:

- фінансові показники (вартість капіталовкладень, строк окупності, рівень ризику);
- технічні характеристики (фізичний стан активів, поточна потужність, строк корисного використання);
- ринкові фактори (конкурентне середовище, прогнозована рентабельність, рівень попиту).

Після визначення основних критеріїв їх необхідно формалізувати у вигляді нечітких множин. Наприклад, значення «висока рентабельність» або «низька вартість» не мають чітких меж, тому їх представлення здійснюється у вигляді функцій належності (трикутних, трапецієвидних, гаусівських тощо).

2. Створення бази правил. Наступним етапом є формування системи логічних правил, які визначають взаємозв'язок між критеріями. Ці правила будуються за принципом: якщо [умова 1] і [умова 2], то [результат].

Наприклад:

- якщо вартість ремонту низька і фізичний стан активу задовільний, то інвестиція є доцільною;
- якщо строк корисного використання наближається до кінця і поточна потужність низька, то необхідно розглянути модернізацію або заміну активу.

Ці правила можуть базуватися на експертних знаннях, історичних відомостях або статистичних закономірностях.

3. Агрегація даних. На цьому етапі проводиться об'єднання отриманої інформації за допомогою функцій належності. Це дозволяє оцінити кожен критерій у рамках визначених нечітких множин.

Для цього можуть використовуватися різні функції:

- трикутні — якщо необхідно представити чітко трактовані значення з поступовим переходом між ними;
- трапецієвидні — підходять для більш гнучкого відображення критеріїв;
- гаусівські — застосовуються для плавного розподілу значень, наприклад, в аналізі потужності енергетичних об'єктів.

Агрегація дозволяє отримати узагальнену оцінку стану активу, що враховує всі вибрані параметри.

4. Дефазифікація. Останнім етапом є перетворення нечітких значень у конкретні числові результати. Це потрібно для ухвалення остаточного рішення про інвестиційний проєкт.

Одним із найпоширеніших методів дефазифікації — метод центроїду, за якого розташовується центр ваги отриманого результату. Цей метод дозволяє одержати числову оцінку, що найбільш точно відображає зважену середню значення всіх критеріїв.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний науковий інтерес до проблем модернізації теплоелектростанцій та оптимізації їхньої діяльності, залишаються низка аспектів, які потребують подальшого дослідження. Сучасні підходи до планування капітальних ремонтів матеріальних активів здебільшого базуються на традиційних методах аналізу, які не враховують невизначеність і високі темпи змін ринкового середовища.

Питання інтеграції зовнішніх факторів, таких як економічні та екологічні умови, а також вплив регуляторних змін на прийняття інвестиційних рішень залишається недостатньо опрацьованим. Сучасні методики планування ремонтів зосереджуються переважно на оцінці поточного технічного стану обладнання без прогнозування його зношеності та потреби в модернізації.

Крім того, існує проблема відсутності практичного впровадження моделей з нечіткою логікою, що могли б ефективно підтримувати процес прийняття рішень щодо капітальних ремонтів. Більшість стратегій залишаються статичними, що ускладнює оперативне реагування на зміни в параметрах функціонування теплоелектростанцій.

Ці невирішені питання формують актуальну проблематику, яка потребує подальших наукових досліджень для підвищення ефективності управління матеріальними активами та інвестиційними рішеннями в енергетичному секторі України.

Мета статті полягає в дослідженні можливостей застосування моделей нечіткої логіки для ефективного планування інвестиційних рішень щодо проведення капітальних ремонтів та модернізації матеріальних активів теплоелектростанцій в Україні. Стаття спрямована на аналіз поточного стану енергетичної системи, визначення основних чинників, які впливають на необхідність проведення капітальних ремонтів, а також апробацію алгоритму для прийняття інвестиційних рішень в умовах високої невизначеності та змінного ринку.

Викладення основного матеріалу. Сучасна енергетична система України перебуває в перехідному стані, що зумовлено не лише численними ворожими обстрілами, а й низкою економічних і політичних змін, а також глобальними викликами — змінами клімату та інтеграцією в європейську енергетичну мережу. Енергетичний сектор є однією з ключових складових інфраструктури країни, оскільки забезпечує безперервне постачання електричної енергії для населення та промисловості і сприяє економічному зростанню та національній безпеці.

Система електроенергетики — складна та динамічна мережа, що не має єдиного центру управління. Генеруючі підприємства постачають енергію до загальної мережі, з якої вона розподіляється до кінцевих споживачів. Локальні електричні мережі з'єднані між собою через спеціалізовані підстанції, що забезпечують безперебійний процес передачі енергії. Важливу роль у цьому процесі

відіграє маневрена генерація, яка здатна швидко реагувати на зміни в попиті та пропозиції енергії. Теплоелектростанції(-централі) (ТЕС(Ц)) завдяки технічним характеристикам можуть оперативно змінювати потужність виробництва електроенергії, що дозволяє забезпечувати стабільність енергетичної мережі. Це робить ТЕС(Ц) ключовими учасниками в управлінні балансом між виробництвом і споживанням енергії, особливо в періоди пікових навантажень або несприятливих умов.

Проте більшість ТЕС(Ц) працюють в умовах війни та постійних обстрілів на базі старіючих матеріальних активів, що вимагає постійних капітальних вкладень для ремонту та модернізації обладнання з урахуванням можливого закриття ТЕС(Ц) відповідно до Енергетичної стратегії України до 2050 року. Враховуючи значні витрати на такі інвестиції, важливим вбачається ефективне планування інвестиційних рішень для оптимізації витрат та максимізації прибутковості підприємств у складних умовах.

Планування інвестицій, зокрема в контексті капітальних ремонтів та модернізації, — складний процес, що вимагає врахування великої кількості змінних факторів, таких як технічний стан обладнання, зміни в законодавстві, рівень екологічних вимог, коливання цін на енергоносії та інших економічних факторів. Оскільки більшість цих факторів невизначені або нечіткі, традиційні методи планування часто не здатні повністю відобразити всі аспекти складних і непередбачуваних процесів, що мають місце в енергетичному секторі.

Традиційні методи, такі як дисконтування грошових потоків або експертні оцінки, часто недостатньо ефективні через суб'єктивізм і обмежену здатність обробляти нечіткі дані. На противагу цьому моделі на основі нечіткої логіки (fuzzy logic) пропонують інноваційний підхід, що дозволяє формалізувати невизначеність і кількісно оцінювати ризики.

Особливу роль у цьому контексті відіграють моделі з нечіткою логікою, які дозволяють здійснювати аналіз і прийняття рішень в умовах неповної, нечіткої або суперечливої інформації. Нечітка логіка, як галузь математичного моделювання, здатна зменшити рівень невизначеності, що дозволяє об'єктивно оцінювати варіанти рішень, навіть коли точні дані недоступні або мають варіативність.

Нечітка логіка є підходом до моделювання, що дозволяє працювати з лінгвістичними змінними та нечіткими наборами.

Основні принципи нечіткої логіки включають:

- використання нечітких множин замість класичних множин;
- роботу з лінгвістичними змінними, які можуть набувати значень у вигляді слів, таких як «високий ризик» або «середня прибутковість»;
- застосування функцій належності для визначення рівня належності елементів до нечіткої множини.

Використання моделей із нечіткою логікою в процесі планування інвестиційних рішень надає підприємствам низку важливих переваг, що сприяють ефективному управлінню матеріальними активами.

По-перше, це гнучкість: нечіткі моделі дозволяють адаптуватися до змін ринкових умов і забезпечують глибокий аналіз складних ситуацій. Завдяки цьому підприємства можуть приймати обґрунтовані інвестиційні рішення навіть за нестабільних економічних умов.

По-друге, це обробка невизначеної інформації: одна з головних переваг нечіткої логіки — здатність працювати з неточною або неповною інформацією. Це особливо важливо, коли рішення ґрунтуються на експертних оцінках, суб'єктивних прогнозах або нечітко визначених параметрах.

По-третє, це інтеграція якісних і кількісних показників: традиційні методи аналізу часто орієнтовані виключно на кількісні дані, тоді як моделі з нечіткою логікою дозволяють одночасно враховувати й якісні фактори. Це сприяє більш комплексному підходу до оцінки інвестиційної привабливості проектів і оптимізації управління матеріальними активами.

На сьогодні дослідження в сфері моделей з нечіткою логікою досягли значного прогресу і охоплюють широкий спектр підходів для аналізу та ухвалення рішень. Ось основні моделі та методи, які використовуються в цій галузі:

Модель за Мамдані (Mamdani)

Одна з найпоширеніших моделей нечіткої логіки. Використовується для побудови систем керування, де основний фокус на інтерпретованості результатів. Підтримує правила виду: якщо X є високим і Y є низьким, тоді Z є середнім. Потребує дефазифікації для отримання чітких результатів.

Приклад застосування: управління кліматом у приміщенні на основі температури та вологості.

Модель за Такегі-Сугено (Takagi-Sugeno)

Різновид моделі Мамдані з чіткими вихідними функціями замість нечітких висновків. Формат правил має вигляд: якщо X є високим і Y є низьким, тоді $Z = aX + bY + c$. Легше оптимізується та інтегрується в системи автоматичного керування.

Приклад застосування: управління двигунами, прогнозування фінансових ринків.

Модель на основі нечітких когнітивних карт (Fuzzy Cognitive Maps, FCM)

Графічне представлення взаємозв'язків між факторами системи з використанням вагових коефіцієнтів, які можуть бути нечіткими значеннями. Дозволяє моделювати складні системи з нелінійними взаємозв'язками.

Приклад застосування: аналіз соціально-економічних процесів, прогнозування розвитку підприємств.

Адаптивна нечітка логіка (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)

Поєднання нечіткої логіки та нейронних мереж. Автоматично налаштовує параметри функцій належності та правил на основі навчальних даних. Забезпечує високу точність при прогнозуванні.

Приклад застосування: прогнозування попиту, аналіз ризиків у фінансовій сфері.

Нечітке регресійне моделювання (Fuzzy Regression Models)

Використовується для моделювання зв'язків між змінними в умовах невизначеності. Може враховувати нечіткість як у параметрах моделі, так і в самих змінних.

Приклад застосування: прогнозування економічних показників, оцінка вартості активів.

Нечіткі кластеризаційні методи (Fuzzy Clustering, FCM)

Класифікація об'єктів із можливістю належності до кількох кластерів одночасно з різним ступенем належності. Відомий алгоритм: Fuzzy C-Means.

Приклад застосування: сегментація ринку, аналіз споживацької поведінки.

Гібридні моделі (Fuzzy + Genetic Algorithms, Fuzzy + Optimization)

Поєднують нечітку логіку з іншими методами оптимізації та обчислювального інтелекту, такими як генетичні алгоритми або методи роїв.

Приклад застосування: оптимізація виробничих процесів, управління портфелем інвестицій.

Для подальшого аналізу буде проведено детальний розгляд прикладу використання Fuzzy Regression для прийняття рішень щодо управління матеріальними активами теплоелектростанцій енергетичного холдингу «ДТЕК», на основі даних операційної звітності за 2021 р. [23].

Аналіз був побудований саме на даних 2021 р. через обмеження щодо розповсюдження та аналізу інформації у сфері енергетики, встановлених Постановою № 349 від 26 березня 2022 р. Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) «Про захист інформації, яка в умовах воєнного стану може бути віднесена до інформації з обмеженим доступом, у тому числі інформації про об'єкти критичної інфраструктури», а також листом Міністерства енергетики України від 30.03.2022 № 26/1.3-24.1-4012 [24].

Приклад розрахунку

— Після обробки правил система визначає, що рівень доцільності інвестиційного проєкту має функцію належності до категорії «перспективний» із певною ймовірністю.

— За допомогою дефазифікації отримується конкретне число, наприклад, 0.72 (де 0 означає «недоцільно», а 1 — «максимально доцільно»).

— Це значення використовується для ухвалення рішення: якщо воно перевищує поріг (наприклад, 0.6), інвестиція вважається виправданою.

Надалі наведемо практичний приклад використання нечіткої регресійної моделі для планування інвестиційних рішень щодо матеріальних активів підприємств енергетичного холдингу «ДТЕК» [23].

1. Постановка задачі. Уявімо, що «ДТЕК» потребує планування інвестиційних рішень щодо проведення капітальних ремонтів енергоблоків ТЕС(Ц) (котлів, турбогенераторів та допоміжного обладнання).

Для цього потрібно оцінити потенційні витрати та необхідність інвестицій на основі таких факторів:

- локалізація об'єктів (схід, центр, захід країни) (цей фактор зазвичай має зв'язок з іншими локальними показниками, як «транспортне плече» до сировини чи підприємств постачальників обладнання, проте внаслідок агресії РФ локалізація активів в рамках України може мати вирішальне значення);

- поточна потужність (низька, середня, висока) (потужність блоків зазвичай розділяється в межах 200 мегават (МВт) — низька потужність, в межах 800 МВт — висока потужність, всі інші віднесені до середнього показника);

- вартість ремонту (низька, середня, висока) (загалом має залежність від потужності енергоблоків);

- фізичний стан (нове, задовільне, зношене);

- залишковий строк корисного життя (короткий, середній, тривалий).

Оскільки ці фактори мають суб'єктивні оцінки та можуть бути невизначеними, традиційна регресія не є ефективною. Нечітка регресійна модель дозволяє враховувати такі особливості.

2. Визначення нечітких змінних і функцій належності. На цьому етапі відбувається формалізація ключових параметрів, які використовуються для оцінки інвестиційної привабливості матеріальних активів підприємства. Кожен параметр представлений у вигляді нечітких змінних, які описуються лінгвістичними значеннями (наприклад, «низький», «середній», «високий») і відповідними функціями належності.

Функції належності визначають рівень належності конкретного значення параметра до певної лінгвістичної категорії.

Вибір типу функції залежить від характеру зміни параметра та особливостей його оцінки:

— Трикутні (трапецієвидні) функції належності застосовуються для змінних із чітко визначеними діапазонами, що поступово змінюються між сусідніми значеннями (на прикладі фізичного стану) (рис. 1).

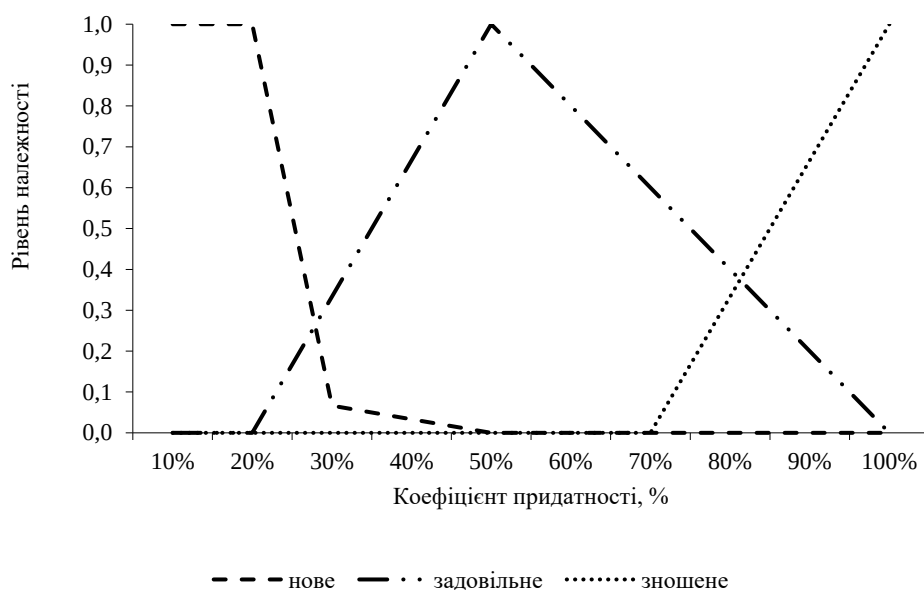


Рисунок 1. Функція належності для фізичного стану
(на прикладі трапецієвидної функції)

Джерело: складено автором.

— Гаусівські функції належності використовуються для параметрів, що мають плавний, неперервний розподіл без різких змін (на прикладі потужності) (рис. 2).

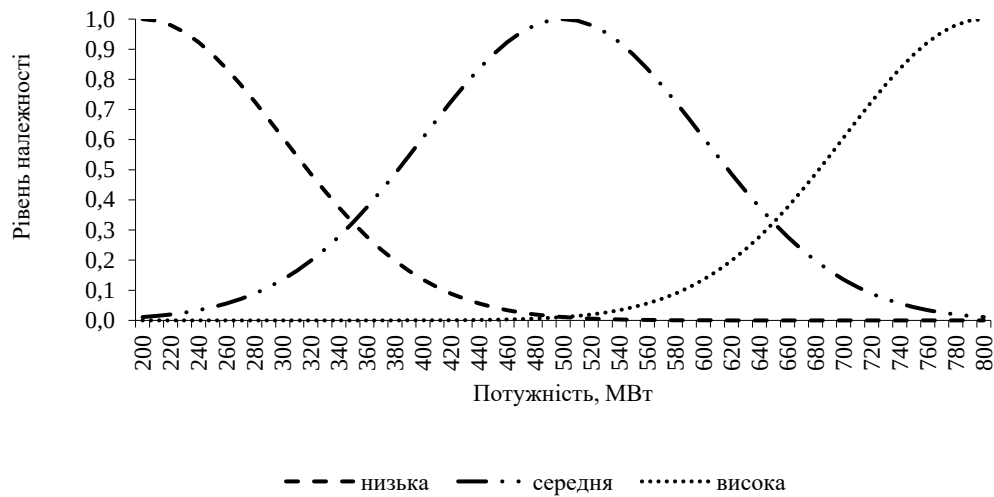


Рисунок 2. Функція належності для потужності
(на прикладі гаусівської функції)

Джерело: складено автором

У табл. 1 відображено ключові параметри, їх лінгвістичні значення та відповідні функції належності.

Таблиця 1

**КЛЮЧОВІ ПАРАМЕТРИ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ
З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ**

№	Параметр	Лінгвістичні значення	Тип функцій належності
1	Локалізація об'єктів	Схід, центр, захід	Трикутні (трапецеєвидні)
2	Поточна потужність	Низька, середня, висока	Гаусівські
3	Вартість ремонту	Низька, середня, висока	Трикутні (трапецеєвидні)
4	Фізичний стан	Нове, задовільне, зношене	Трикутні (трапецеєвидні)
5	Строк корисного життя	Короткий, середній, тривалий	Трикутні (трапецеєвидні)

Джерело: складено автором.

3. Формування правил нечіткої логіки. Далі наведемо перелік, на прикладі декількох, правил побудованих на ключових параметрах:

- Якщо локалізація захід, поточна потужність висока і фізичний стан новий, тоді потреба в капітальному ремонті низька.
- Якщо локалізація центр, потужність середня і фізичний стан задовільний, тоді потреба в капітальному ремонті середня.
- Якщо локалізація захід, потужність низька і фізичний стан зношений, тоді потреба в капітальному ремонті висока.

• Якщо вартість ремонту висока і строк корисного життя короткий, тоді потреба в капітальному ремонті низька.

4. Побудова регресійної моделі. Для визначення взаємозв'язку між різними факторами та рівнем необхідності капітального ремонту енергетичних блоків побудована нечітка регресійна модель. Ця модель дозволяє оцінювати вплив кожного параметра та адаптуватися до умов невизначеності. Математичне подання нечіткої регресії має вигляд:

$$CR = a_1xL + a_2xP + a_3xRC + a_4xPD + a_5UL + b,$$

де CR — необхідність проведення капітального ремонту; L — локалізація об'єкта; P — поточна потужність; RC — вартість ремонту; PD — фізичний стан; UL — строк корисного життя; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 — вагові коефіцієнти, що визначають вплив кожного фактора; b — константа, що враховує додаткові умови.

Значення вагових коефіцієнтів визначаються на основі історичних даних та/або експертних оцінок, що містять інформацію про успішні та невдалі інвестиційні рішення щодо проведення капітальних ремонтів. Це дозволяє налаштувати модель так, щоб відповідала реальним умовам функціонування підприємства.

5. Дефазифікація та аналіз результатів. Для оцінки інвестиційної привабливості матеріального активу здійснено фазифікацію ключових параметрів, що характеризують його техніко-економічний стан:

- локалізація — захід (ступінь належності: 0.6 до «центр», 0.4 до «схід»);
- поточна потужність — середня (рівень належності: 0.8);
- вартість ремонту — висока (рівень належності: 0.7);
- фізичний стан — зношений (рівень належності: 0.9);
- строк корисного життя — короткий (рівень належності: 0.75).

На основі отриманих значень сформовано нечітке значення інвестиційної привабливості, що характеризується такими рівнями належності:

- 0.5 — до низької привабливості;
- 0.4 — до середньої привабливості;
- 0.1 — до високої привабливості.

Для перетворення отриманого нечіткого висновку у кількісну оцінку застосовано процедуру дефазифікації методом центру ваги, що є одним із найпоширеніших підходів у нечіткій логіці:

$$CR = (0.5 \times 2) + (0.4 \times 5) + (0.1 \times 8) = 3.3$$

Отримане значення 3.3 свідчить про середній рівень інвестиційної привабливості, що вимагає подальшого аналізу економічної доцільності інвестування у модернізацію або капітальний ремонт активу. На основі цього результату можуть бути розроблені альтернативні сценарії розвитку, що враховують як додаткові технічні параметри, так і можливі зміни зовнішнього середовища (економічні, технологічні та регуляторні фактори).

Результати аналізу для зручності можна інтерпретувати у вигляді графіків для прийняття управлінських рішень (рис. 3).

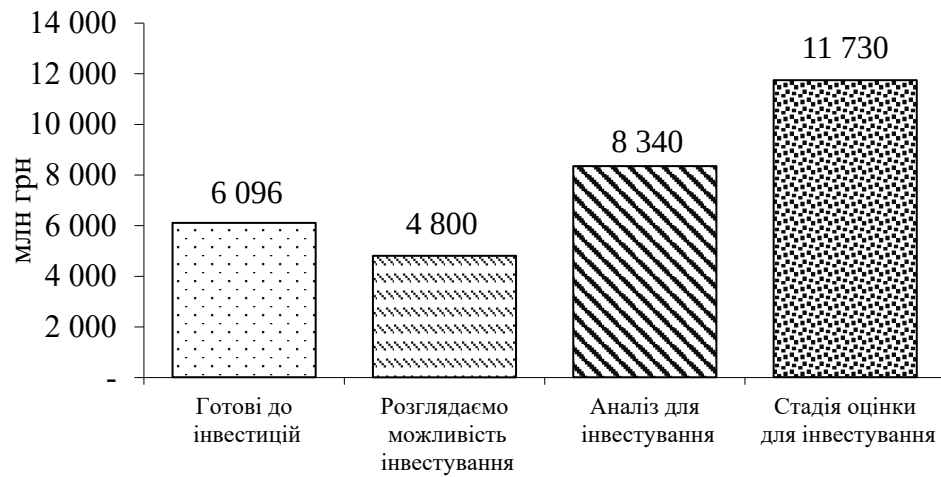


Рисунок 3. Діаграма інтерпретації отриманих результатів готовності до інвестицій (проведення капітальних ремонтів) енергетичних блоків (на прикладі ТЕС(Ц) холдингу «ДТЕК»)

Джерело: складено автором на основі [23].

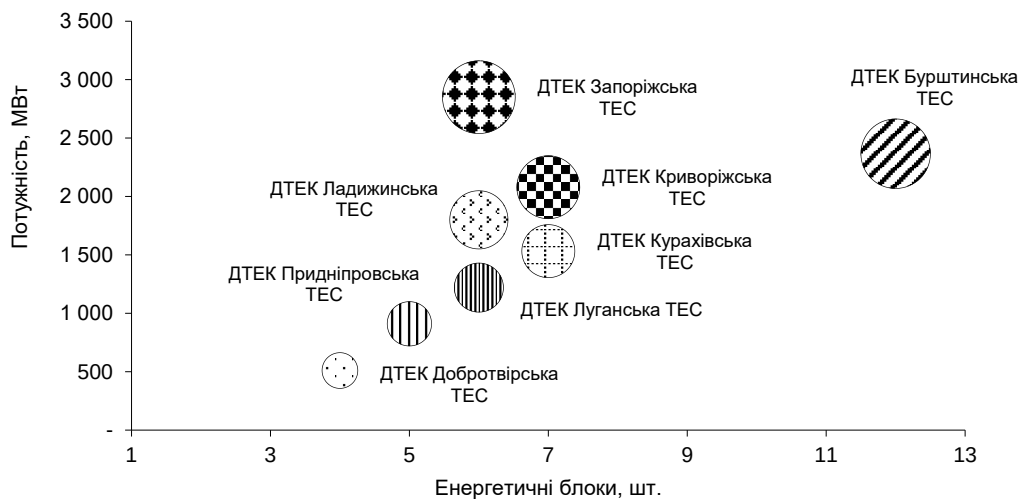


Рисунок 4. Діаграма інтерпретації отриманих результатів щодо обсягу інвестицій (проведення капітальних ремонтів) енергетичних блоків (на прикладі ТЕС(Ц) холдингу «ДТЕК»)

Джерело: складено автором на основі [23].

Висновки. Застосування нечітких моделей у процесі прийняття інвестиційних рішень щодо капітальних ремонтів на ТЕС(Ц) є перспективним підходом, який дозволяє враховувати високий рівень невизначеності, притаманний енергетичному сектору в сучасних умовах України. Використання такого підходу сприяє підвищенню обґрунтованості та ефективності рішень, забезпечуючи комплексний аналіз економічних вигід і потенційних ризиків.

Значною перевагою нечітких моделей є їхня здатність адаптуватися до змін зовнішніх та внутрішніх факторів, що особливо актуально для енергетичного сектору України. Зміни тарифної політики, субсидування, інтеграція з європейськими ринками енергоресурсів, а також нестабільність вартості паливних ресурсів роблять традиційні методи аналізу менш ефективними. У цьому контексті використання нечіткої логіки дозволяє приймати більш адаптивні та оперативні інвестиційні рішення.

Попри значні переваги, застосування моделей з нечіткою логікою має певні обмеження:

- Складність побудови моделі — необхідність залучення галузевих експертів для коректного формулювання правил нечіткої логіки та визначення функцій належності.
- Чутливість до вибору функцій належності — різні типи функцій можуть давати відмінні результати, що впливає на точність прогнозування.
- Проблеми дефазифікації — перетворення нечітких результатів у конкретні числові значення може призводити до втрати інформації та спрощення складних залежностей.

Незважаючи на ці виклики, використання нечіткої логіки є ефективним інструментом підтримки прийняття інвестиційних рішень у ситуаціях невизначеності, що дозволяє:

- зменшити вплив суб'єктивізму експертних оцінок, що підвищує об'єктивність аналізу;
- інтегрувати як кількісні, так і якісні критерії в єдину систему оцінювання;
- генерувати гнучкі сценарії розвитку, що враховують ймовірні зміни зовнішніх факторів.

Перспективи подальшого удосконалення такого підходу полягають у розробці гібридних моделей, що поєднують нечітку логіку з методами машинного навчання, а також у використанні сучасних цифрових інструментів (Excel, MATLAB, Python, спеціалізовані платформи) для адаптації до специфіки енергетичної галузі. Це дозволить підвищити точність прогнозування та оптимізувати планування капітальних вкладень у модернізацію матеріальних активів підприємств.

Література

1. Енергетика України у червні 2024 р. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-ПАКТ-12.pdf>.
2. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. — 1965. — №8. — P. 338–353.
3. Mamdani E. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proc. IEEE. — 1974. — Vol. 121. — P. 1585–1588.
4. Mamdani E., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7. — P. 1–13.

5. Sugeno M., Nishida M. Fuzzy control of model car // *Fuzzy Sets and Systems*. — 1985. — Vol. 16. — P. 103–113.
6. O'Hagan M. A Fuzzy Decision Maker // *Proc. Fuzzy Logic '93 (Computer Design Magazine)*. — P. M313.
7. O'Hagan M. Fuzzy Decision Aids // *Proc. 21st Annual Asilomar Conf. On Signals, Systems, and Computers (IEEE and Maple Press, Pacific Grove, CA)*. — 1987. — Vol. 2. — P. 624.
8. De Luca A., Termini S. A definition of a non-probabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory // *Information and Control*. — 2002. — Vol. 20. — P. 301–312.
9. De Luca A., Termini S. Algebraic properties of fuzzy sets // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. — 2002. — Vol. 40. — P. 373–386.
10. De Luca A., Termini S. Entropy of L-fuzzy sets // *Information and Control*. — 2004. — Vol. 24. — P. 55–73.
11. De Luca A., Termini S. On the convergence of entropy measures of fuzzy sets // *Kybernetes*. — 2007. — Vol. 6. — P. 219–227.
12. De Luca A., Termini S. Entropy and energy measures of a fuzzy set // In: *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications* / Ed. by M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager. — Amsterdam: North-Holland, 2009. — 321 p.
13. De Luca A., Termini S. On some algebraic aspects of the measures of fuzziness // In: *Fuzzy Information and Decision Processes* / Ed. by M. M. Gupta, E. Sanchez. — Amsterdam: North-Holland, 2002. — P. 17–24.
14. Матвійчук А. В. Моделювання економічних процесів із застосуванням методів нечіткої логіки. — Київ: КНЕУ, 2007. — 264 с.
15. Mutviychuk A. V. Bankruptcy Prediction in Transformational Economy: Discriminant and Fuzzy Logic Approaches // *Fuzzy Economic Review*. — 2010. — Vol. XV, № 1. — P. 21–38.
16. Матвійчук А. В. Дискримінантна модель оцінки ймовірності банкрутства // *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. — 2006. — Вип. 74. — С. 299–314.
17. Котов Б. І., Грищенко В. О. Нечітка автоматична система керування охолоджувачем повітря на ТЕС // *Journal of Automation and Information Technology*. — 2022. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://journal.imaap.org.ua>.
18. Остапчук О. В., Вожаков Р. В., Болотний М. П. Автоматизовані системи управління та оптимізація режимів електричних станцій: навчальний посібник. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57384/1/ASU_Lab.pdf (дата звернення: 09.02.2025).
19. Невмержицький О. В. Аналіз сучасних моделей, орієнтованих на знання, та методів прийняття рішень // *Інформаційні технології проектування*. — 2013. — № 13. — С. 119–125.
20. Дубчак Л. Метод обробки нечітких даних на основі механізму Мамдані // *Системи обробки інформації*. — 2012. — Вип. 7(105). — С. 131.
21. Лозинський А., Демків Л. Дослідження впливу вигляду функції належності на динамічні показники системи при багатокритеріальній оптимізації зі змінними ваговими коефіцієнтами // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. — 2012. — Вип. 5. — С. 137–144.
22. Штовба С. Д. Побудова функцій належності нечітких множин за кластеризацією експериментальних даних // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. — 2006. — № 2. — С. 92–95.
23. DTEK Annual Report 2020 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://dtek.com/content/announces/dtek_ar_2020_ua_web_plus_file_download_s1179_t4273_i5958_orig.pdf.
24. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Про внесення змін до постанови НКРЕКП від

References

1. Energy of Ukraine in June 2024 [Electronic resource]. — Access mode: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf>.
2. Zadeh L. Fuzzy Sets // *Information and Control*. — 1965. — No. 8. — P. 338–353.
3. Mamdani E. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // *Proc. IEEE*. — 1974. — Vol. 121. — P. 1585–1588.
4. Mamdani E., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. — 1975. — Vol. 7. — P. 1–13.
5. Sugeno M., Nishida M. Fuzzy control of model car // *Fuzzy Sets and Systems*. — 1985. — Vol. 16. — P. 103–113.
6. O'Hagan M. A Fuzzy Decision Maker // *Proc. Fuzzy Logic '93 (Computer Design Magazine)*. — P. M313.
7. O'Hagan M. Fuzzy Decision Aids // *Proc. 21st Annual Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers (IEEE and Maple Press, Pacific Grove, CA)*. — 1987. — Vol. 2. — P. 624.
8. De Luca A., Termini S. A definition of a non-probabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory // *Information and Control*. — 2002. — Vol. 20. — P. 301–312.
9. De Luca A., Termini S. Algebraic properties of fuzzy sets // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. — 2002. — Vol. 40. — P. 373–386.
10. De Luca A., Termini S. Entropy of L-fuzzy sets // *Information and Control*. — 2004. — Vol. 24. — P. 55–73.
11. De Luca A., Termini S. On the convergence of entropy measures of fuzzy sets // *Kybernetes*. — 2007. — Vol. 6. — P. 219–227.
12. De Luca A., Termini S. Entropy and energy measures of a fuzzy set // In: *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications* / Ed. by M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager. — Amsterdam: North-Holland, 2009. — 321 p.
13. De Luca A., Termini S. On some algebraic aspects of the measures of fuzziness // In: *Fuzzy Information and Decision Processes* / Ed. by M. M. Gupta, E. Sanchez. — Amsterdam: North-Holland, 2002. — P. 17–24.
14. Matviychuk A. V. Modeling of Economic Processes Using Fuzzy Logic Methods. — Kyiv: KNEU, 2007. — 264 p.
15. Mutviychuk A.V. Bankruptcy Prediction in Transformational Economy: Discriminant and Fuzzy Logic Approaches // *Fuzzy Economic Review*. — 2010. — Vol. XV, No. 1. — P. 21–38.
16. Matviychuk A. V. Discriminant Model for Estimating Bankruptcy Probability // *Modeling and Information Systems in Economics*. — 2006. — Issue 74. — P. 299–314.
17. Kotov B. I., Hryshchenko V. O. Fuzzy Automatic Control System for Air Cooler at a Thermal Power Plant // *Journal of Automation and Information Technology*. — 2022. [Electronic resource]. — Access mode: <https://journal.imaap.org.ua>.
18. Ostapchuk O. V., Vozhakov R. V., Bolotny M. P. Automated Control Systems and Optimization of Electric Station Modes: Tutorial. — Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2019. [Electronic resource]. — Access mode: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57384/1/ASU_Lab.pdf (Accessed: 09.02.2025).
19. Nevmerzhitsky O. V. Analysis of Modern Knowledge-Oriented Models and Decision-Making Methods // *Information Technology in Design*. — 2013. — No. 13. — P. 119–125.
20. Dubchak L. The Method of Fuzzy Data Processing Based on the Mamdani Mechanism // *Information Systems Processing*. — 2012. — Issue 7(105). — P. 131.