

С.В. Бойченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980І.О. Шкільнюк¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570Р.Є. Костюник², канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-0232-9208В.О. Коровушкін¹, аспірант, ORCID 0000-0002-7571-7124К.М. Лутченко³, ORCID 0009-0001-0480-2591¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Державний університет «Київський авіаційний інститут»³10 хімотологічний Центр МО України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВІАЦІЙНОГО КЕРОСИНУ F-35 В УМОВАХ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

Метою роботи є дослідження процесу зношування модельного вузла тертя ковзання в середовищі традиційного авіаційного палива для порівняльного аналізу зразків палива з дослідними біодобавками та оцінки їх здатності формувати захисні плівки, що знижують силу тертя та інтенсивність зношування. Дослідження проводилося на випробувально-вимірювальному комплексі «НАУ-01», що включає машину тертя АСК-01, яка підтримує постійну геометрію лінійного контакту між зразками зі сталі ШХ15. Як еталонну рідину було використано авіаційний гас F-35 (Jet A-1, NATO F-35). В ході дослідження виконувалось п'ять повторних чотирьохетапних випробувань на комплексі НАУ-01 (АСК-01) при 100 Н і 0,3 м/с; фінішне доведення зразка до $Ra \approx 0,02 \text{ мкм}$. В результаті середнє сумарне лінійне зношування = 24,89 мкм; середній макс. об'єм $\approx 0,053 \text{ мм}^3$; масові втрати контрзразків 0,0001–0,0002 г, плоских 0,0003–0,0012 г; температура контакту до 36,8 °С; виявлено комбінований адгезійно-абразивний характер зносу і вторинні трибофільми. Порівняльний аналіз методів метрології зносу виявив, що профілометричні (лінійні та об'ємні) вимірювання забезпечили надійні дані з відносною похибкою нижче 7%, тоді як гравіметричний метод виявився непридатним через високу межу похибки ($\geq 50\%$). Статтю підготовлено в рамках грантового проєкту Національного фонду досліджень України «Експериментально-аналітичні засади надійності авіаційної техніки подвійного призначення удосконаленням технології використання авіаційних палив згідно вимог стандартів ASTM і NATO» (проєкт № 0124U004599).

Ключові слова: авіаційний керосин F-35, трибологія, тертя ковзання, протизносні властивості, профілометрія, об'ємний знос, вторинні структури.

Вступ. Авіаційне паливо в газотурбінних двигунах виконує подвійну функцію: воно є не лише джерелом енергії, але й основним мастильним матеріалом для високоточних компонентів паливної апаратури, таких як плунжерні насоси, форсунки та регулятори [1]. Недостатня змащувальна здатність палива є однією з головних причин підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу прецизійних пар тертя, де паливо є єдиним мастилом [2]. З огляду на постійне зростання вимог до паливної ефективності та надійності авіаційних двигунів, розробка передових методів для точної характеристики протизносних властивостей палива набуває критичного значення, особливо в контексті впровадження нових рецептур палива, включаючи екологічно сталі альтернативи (Sustainable Aviation Fuels – SAFs) [3].

Стандартні методи трибологічної оцінки включають [4,5]:

1. Чотирикульковий тест (ASTM D4172, D2266, D2783), що є одним з основних для оцінки протизносних властивостей та характеристик за умов екстремального тиску (EP). Його принцип полягає в обертанні однієї сталевий кульки по трьох нерухомих, що створює висококонцентровані точкові контакти. Основними вимірюваними параметрами є діаметр плями зносу, індекс задиру (LWI) та навантаження зварювання (weld point). Хоча цей тест є ефективним для скринінгу, його геометрія точкового контакту не завжди репрезентативна для всіх вузлів тертя в паливних системах.

2. Тест «Штифт-на-диску» (Pin-on-Disc, ASTM G99) – універсальний метод, де штифт ковзає по обертовому диску при заданому навантаженні, швидкості й шляху. Вимірюють коефіцієнт тертя, ширину/глибину сліду, лінійний та об'ємний знос і масові втрати; простий для скринінгу, але геометрія контакту може не відтворювати складні інженерні вузли.

3. Коливне/рециркувальне ковзання (Reciprocating sliding, ASTM G133), що використовується для моделювання циклічних режимів тертя. Його принцип полягає у зворотньо-поступальному русі контактуючих поверхонь по визначеному ходу під дією навантаження. Основними вимірюваними параметрами є коефіцієнт тертя в динаміці циклів, глибина та форма зносної доріжки, а також накопичувальний об'ємний знос. Тест дозволяє достовірно оцінити поведінку матеріалів та мастильних середовищ у поршневих, клапанних і ущільнювальних вузлах, але потребує більш тривалих випробувань.

Хоча стандартні методи є незамінними, існує потреба в методиках, що забезпечують Вибір даного способу випробувань обумовлений тим, що він має ряд переваг для дослідження ВС, таких як:

- Контрольована геометрія контакту;
- Можливість вимірювання параметрів (навантаження, швидкість ковзання, температура випробувального та навколишнього середовища), що дозволяє досліджувати їх вплив на формування ВС;
- Зручність проведення аналізу складу та будову утворених ВС.

Для розроблення методики трибологічних випробувань та порівняльної оцінки ефективності дослідних зразків авіаційного палива з біодобавками в якості «еталонного» зразка палива вибрано авіаційний керосин (F-35). Забезпечення можливості проведення коректних повторних випробувань в однакових зовнішніх умовах, на першому етапі виконувалось шляхом проведення підготовчих робіт щодо виготовлення сталених випробувальних зразків модельного вузла тертя АСК-01 та фінішного доведення їх робочих поверхонь на спеціальному обладнанні за відповідним алгоритмом

Мета та завдання: дослідження процесу зношування модельного вузла тертя ковзання в середовищі дослідного традиційного авіаційного палива для порівняльного аналізу результатів випробувань з результатами протизносних властивостей суміші палива з дослідними зразками біодобавок та оцінки їх здатності утворювати на робочих поверхнях ефективні захисні плівки, що сприяють зниженню сили тертя й інтенсивності зношування.

Матеріал і результати досліджень

Для розроблення методики трибологічних випробувань та порівняльної оцінки ефективності дослідних зразків авіаційного палива з біодобавками в якості «еталонного» зразка палива вибрано авіаційний керосин (F-35). Забезпечення можливості проведення коректних повторних випробувань в однакових зовнішніх умовах, на першому етапі виконувалось шляхом проведення підготовчих робіт щодо виготовлення сталених випробувальних зразків модельного вузла тертя АСК-01 та фінішного доведення їх робочих поверхонь на спеціальному обладнанні за відповідним алгоритмом (рис.1).

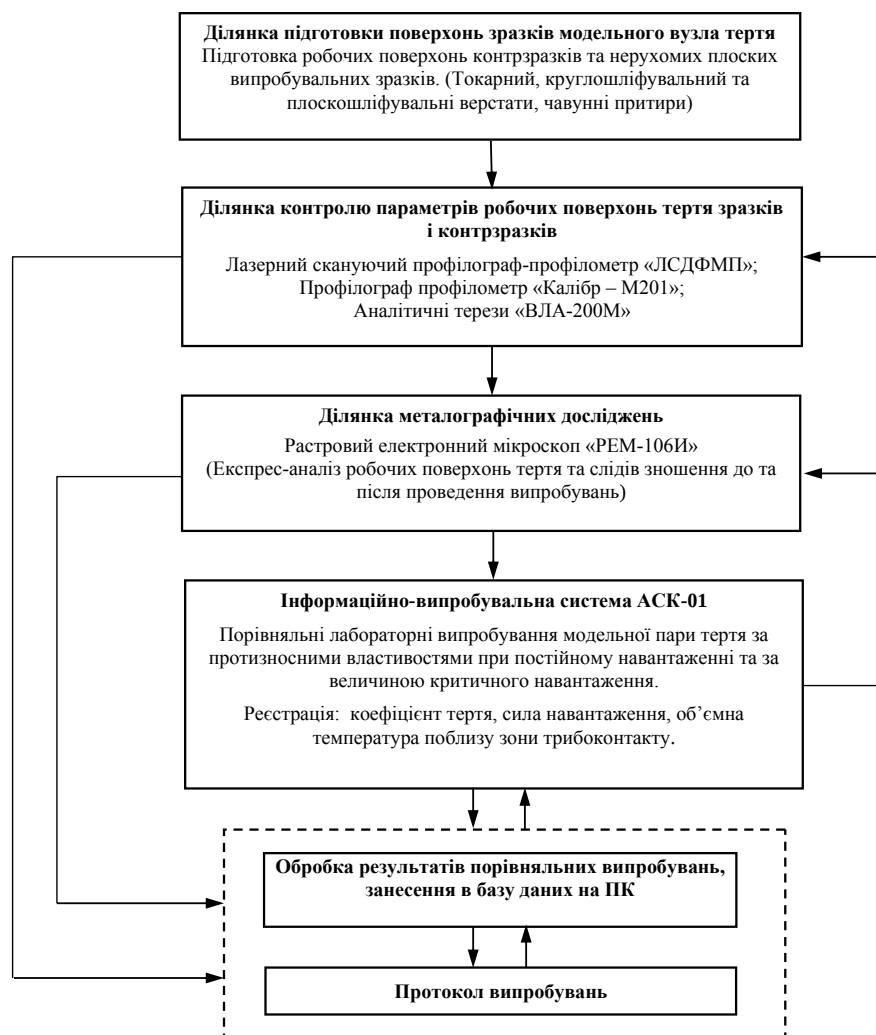


Рисунок 1 – Алгоритм проведення порівняльних випробувань дослідних палив

Початкова підготовка робочих поверхонь модельних нерухомих плоских зразків проводилась на плоскошліфувальному верстаті. Подальше фінішне доведення кожного з цих зразків виконувалось в ручному режимі із використанням спеціальної оправки на чавунних притирах та алмазних паст, починаючи від 40/28 і поступово переходячи до 1/0, до отримання відповідної робочої шорсткості поверхонь Ra 0,02.

В якості випробувальних контрзразків спеціально виготовлені зі сталі ШХ15 ролики зовнішнім діаметром 33 мм і товщиною 3 мм, ідентичні за структурою та твердістю (HRC 58-63) матеріалу. Контрзразки виготовлювались шляхом шліфування робочої поверхні зразків, зібраних в касету (рис. 2), на круглошліфувальному верстаті з наступним доведенням по утворюючій циліндр з використанням вищенаведених алмазних паст у тій же послідовності та зміною спеціальних притирів до шорсткості Ra 0,02. Контроль шорсткості робочих поверхонь контрзразків та нерухомих зразків проводиться на лазерному скануючому мікроскопі профілометрі ЛСДФМП. Така висока ступень доведення робочих поверхонь дозволяє мінімізувати можливість мікрорізання з однієї сторони, а з другої сторони багаторазово підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікроскопювання утворених ВС в граничних шарах змазки, що неминуче виникає при граничному терті [6].



Рисунок 2 – а) пара тертя; б) 25 контрзразків зібрані в касету;
1 – контрзразок; 2 – плоский нерухомий зразок.

На (рис.3) наведено результати досліджень робочих поверхонь плоских нерухомих зразків, що проведені на лазерному мікроскопі «ЛСДФМП» після їх фінішного доведення алмазними пастами на чавунних притирах перед виконанням серії досліджень.

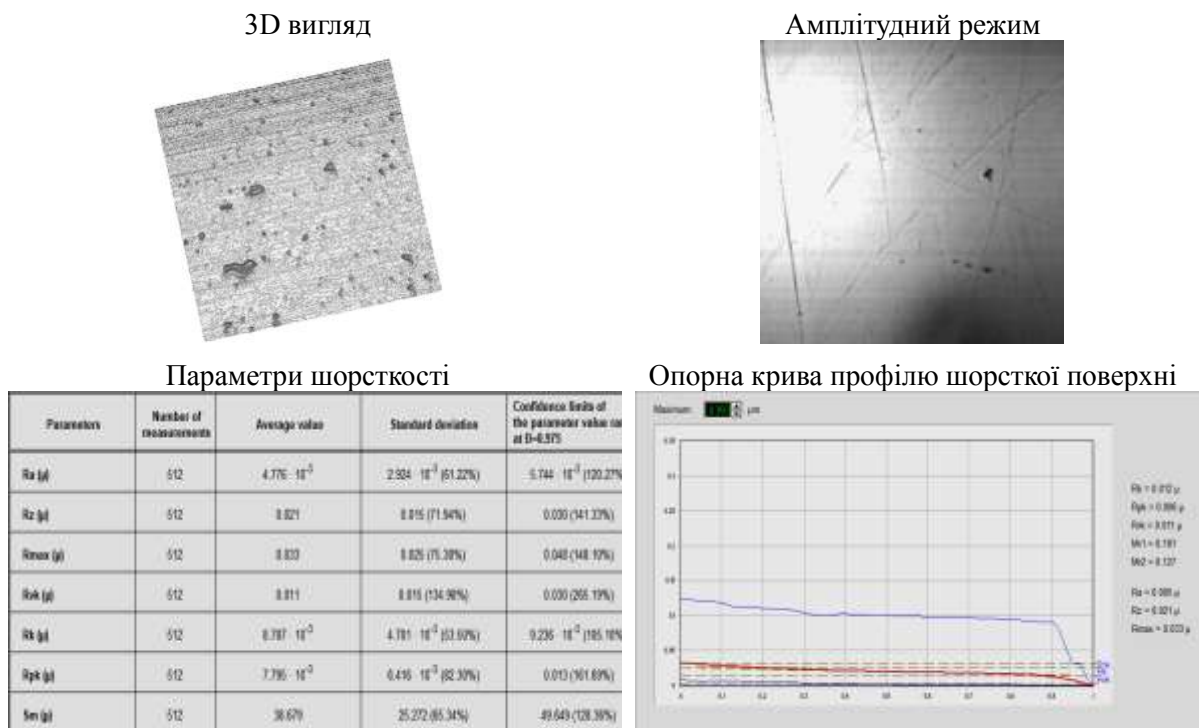


Рисунок 3 – Результати вимірювання шорсткості робочих поверхонь зразків (ШХ 15)

На відміну від контактного профілометра прилад дозволяє отримати 512 профілограм, за якими автоматично будується крива та невизначеність за профілем (від мінімумів до максимумів). В процесі виконання модернізації ЛСДФМП в програму був вшитий модуль вимірювань параметрів шорсткості за ISO на основі кривої Аббота-Файерстоуна. Опорна крива профілю (ОКП) шорсткої поверхні запропонована як узагальнена характеристика якості поверхонь деталей після механічної обробки, досить проста та зручна для практичного застосування.

Після проведення лабораторних триботехнічних випробувань «еталонного» палива на протизносні властивості отримані результати шляхом вимірювання кожного сліду зносу на робочій поверхні нерухомого зразка стандартними методами профілографії, мікроскопії та математичних розрахунків заносились в таблиці (1-4) у вигляді середнього значення лінійного зношення, втрати маси та об'єму зношеного матеріалу.

Динаміка зношування пари тертя визначалась побудовою графіків для всієї серії випробувань дослідного «еталонного» зразка палива (№1, №2, №3, №4 та №5), на осі абсцис якого відкладався шлях тертя, а на осі ординат – глибина чи об'єм зношеного матеріалу (рис. 4 - 6).

Оцінку зносу робочих поверхонь плоских зразків робили за втратою маси випробувальних зразків для кожного дослідного зразка палив (масовий знос).

Таблиця 1 - Результати вимірювання лінійного зносу (I, мкм) нерухомого зразка

№ з/п	Етапи тертя у відповідності методики випробувань			
	1 етап тертя – 270 м	2 етап тертя – 270 м	3 етап тертя – 270 м	4 етап тертя – 2430 м
1	$\frac{3,5 + 3,5 + 4,0}{3} = 3,67$	$\frac{4,0 + 3,0 + 3,75}{3} = 3,58$	$\frac{4,0 + 3,75 + 3,25}{3} = 3,67$	$\frac{9,0 + 13,0 + 17,0}{3} = 13,0$
2	$\frac{3,5 + 6,75 + 7,5}{3} = 5,92$	$\frac{2,5 + 3,0 + 3,75}{3} = 3,08$	$\frac{2,25 + 3,5 + 3,5}{3} = 3,08$	$\frac{15,0 + 13,0 + 12,0}{3} = 13,3$
3	$\frac{3,2 + 4,2 + 3,8}{3} = 3,73$	$\frac{4,0 + 5,2 + 3,2}{3} = 4,13$	$\frac{3,25 + 4,2 + 4,75}{3} = 4,06$	$\frac{13,0 + 16,2 + 12,0}{3} = 13,73$
4	$(4,75 + 2,45 + 3,0)/3 = 3,4$	$(3,5 + 3,75 + 2,75)/3 = 3,33$	$(3,75 + 4,5 + 4,0)/3 = 4,08$	$\frac{12,75 + 13,0 + 12,0}{3} = 13,58$
5	$\frac{4,25 + 4,75 + 3,25}{3} = 4,08$	$\frac{3,75 + 4,75 + 4,0}{3} = 4,16$	$\frac{4,08 + 3,25 + 4,25}{3} = 3,86$	$\frac{11,25 + 14,5 + 13,25}{3} = 13,0$
I _{ср}	4,16	3,66	3,75	13,32

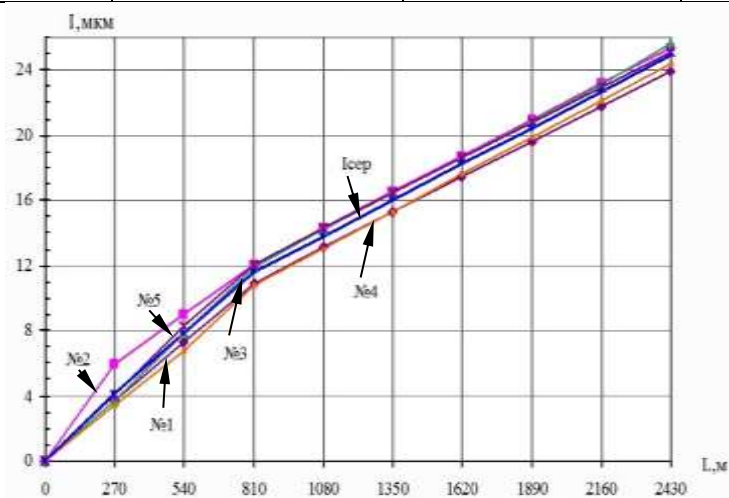


Рисунок 4 – Серія (п'ять) повторних експериментальних випробувань дослідного авіаційного палива F-35

Вимірювання маси штатних попередньо підготовлених контрзразків і плоских нерухомих зразків, до та після проведення випробувань, проводилось на аналітичних терезах моделі ВЛА-200г-М з точністю 0,0001 г. Результати зважування наведено у (табл. 2 - 3) та рисунках 5, 6.

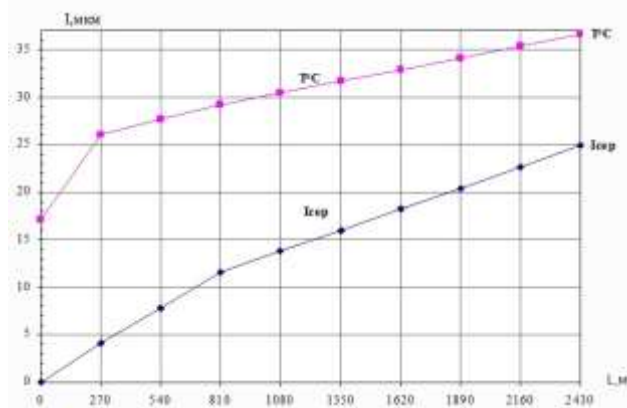


Рисунок 5 – Залежність зношення плоского нерухомого зразка від шляху тертя

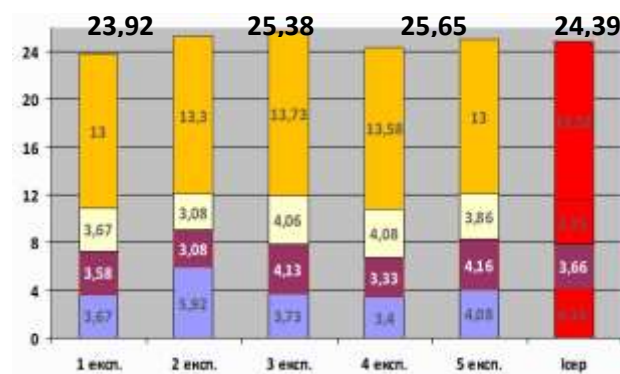


Рисунок 6 – Сумарне значення лінійного зношення нерухомого зразка для кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань палива при рівних зовнішніх умовах

Таблиця 2 - Результати зважування маси контрзразків

Контрзразки	Номер контрзразка (ШХ15) у відповідності до типу палива				
	№1	№2	№3	№4	№5
	Маса, г.				
До випробувань	10,6867	10,6858	10,6864	10,6862	10,6869
Після випробувань	10,6866	10,6857	10,6862	10,6861	10,6868
Маса зношеного Матеріалу	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001

Таблиця 3 - Результати зважування маси плоских нерухомих зразків

Плоскі зразки	Номер плоского зразка у відповідності до типу палива				
	№1	№2	№3	№4	№5
	Маса, г.				
До випробувань	25,1683	25,1693	25,1700	25,1683	25,1696
Після випробувань	25,1680	25,1684	25,1688	25,1677	25,1692
Маса зношеного Матеріалу	0,0003	0,0009	0,0012	0,0006	0,0004

В процесі роботи будь-яка реальна трибосистема проходить через такі стадії роботи, як припрацювання, знос що стабілізується у часі та катастрофічне зношування деталей [7]. Так і в даному випадку, із графіків (Рис. 4, 5 та 6), видно, що на перших етапах роботи при терті в умовах змащення (від 0 до 810 м пройденого шляху), при нестационарному режиму роботи, відбувалось формування робочих поверхонь, котрі взаємодіяли з різною швидкістю зношування. Стабілізація поточних параметрів (постійна швидкість зношування) на наступних етапах свідчила про початок виходу дослідної пари тертя на стаціонарний режим роботи. Поступове підвищення швидкості зношування зразків у часі вказує на

експлуатаційні властивості відповідного дослідного змащувального середовища. Подальша тривала робота зразка дослідного палива з більш низькими трибологічними властивостями наймовірніше спричинить швидше схоплення та руйнування поверхонь тертя, ніж у середовищі «еталонного» авіаційного палива F-35, що неминуче призведе до катастрофічнішого зношування робочих деталей модельного вузла тертя [8].

Фрактографічний експрес-аналіз руйнування робочої поверхні нерухомого зразка від тертя ковзання контрзразком (ШХ15) в умовах змащення середовищем авіаційного керосину проводився на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. Штатне програмне забезпечення котрого дозволило визначити межі слідів зношення та шляхом маркування їх габаритних розмірів заміряти реальну довжину і ширину. Для прикладу, на рис. 6 наведено вимірювання слідів зношення робочої поверхні зразка після проведення повторного порівняльного експерименту №1, трибологічних лабораторних випробувань дослідного авіаційного палива F-35. За результатами експериментальних визначень та вимірювань реального радіусу контрзразків ($R=16,5\text{мм}$) було розраховано параметри сегмента та його площу (переріз або профіль сліду зносу) прийнявши бічну сторону визначеного прямокутника за довжину хорди кола (контрзразка).

Підставивши розрахункове значення площі сегмента $S_{n,n}$ слідів зношення матеріалу та вимірної ширини доріжок тертя $L_{n,n}$ в формулу (1) отримано об'єм зношеного матеріалу нерухомих плоских зразків кожного випробування, після чого результати заносились у таблицю 4 з урахуванням чотирьох-етапної методики випробувань.

$$V_{n,n} = S_{n,n} \times L_{n,n} \quad (1)$$

За результатами експериментальних вимірювань та математичних розрахунків визначали динаміку зношування пари тертя побудовою графіка, де на осі абсцис відкладався шлях тертя, а на осі ординат – розрахункові масу (рис. 7) та об'єм зношеного матеріалу (рис.8).

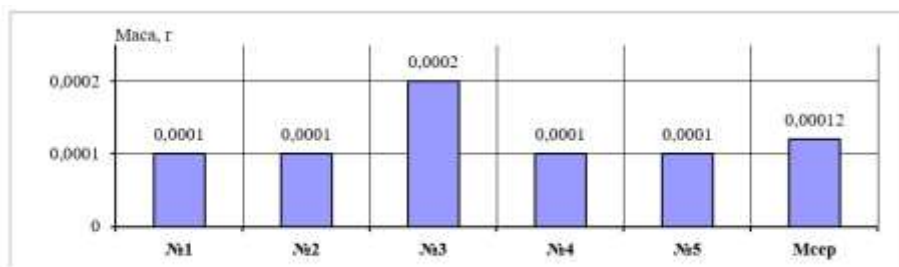


Рисунок 7 – Втрата маси контрзразка при терті ковзання по плоскому нерухомому зразку для кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань

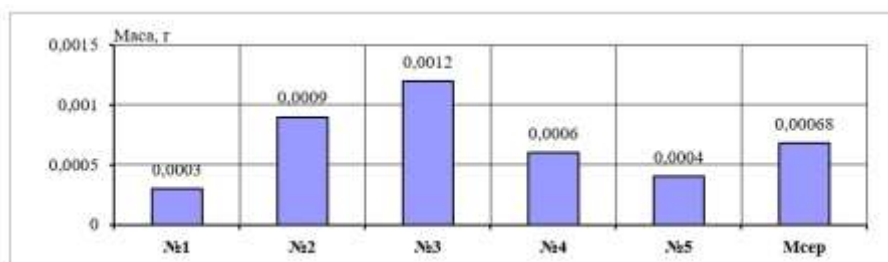


Рисунок 8 - Втрата маси плоского нерухомого зразка при терті ковзання кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань

Визначено достовірність проведених випробувань за результатами вимірювань середнього значення максимального об'єму зношеного матеріалу модельної пари тертя п'яти повторних експериментів шляхом розрахунку відносної та абсолютної похибки.

Жовто-коричневий колір продуктів зношування зразків пари тертя при дослідженні середовища палива свідчить про помірний рівень нагріву в зоні їх контактування [9]. Для більш точно визначення причини та складу продуктів зношування, необхідно провести додаткові дослідження, такі як: спектральний і рентгено-фазовий аналіз та мікроскопічні дослідження [10]. Це допоможе визначити елементний склад, ідентифікувати кристалічні фази продуктів зношування та дозволить оцінити морфологію мікрочастинок і характер зносу поверхонь тертя.

Таблиця 4 - Результати розрахунку об'єму зношеного матеріалу доріжок тертя

№ сліду Назва зразка	1 слід	2 слід	3 слід	4 слід
№1	$V_{1.1}=0,00501147\text{мм}^3$	$V_{1.2}=0,004489158\text{мм}^3$	$V_{1.3}=0,004511272\text{мм}^3$	$V_{1.4}=0,034712922\text{мм}^3$
№2	$V_{2.1}=0,00474949\text{мм}^3$	$V_{2.2}=0,005131263\text{мм}^3$	$V_{2.3}=0,004496655\text{мм}^3$	$V_{2.4}=0,042535833\text{мм}^3$
№3	$V_{3.1}=0,00426512\text{мм}^3$	$V_{3.2}=0,0053112316\text{мм}^3$	$V_{3.3}=0,0052335577\text{мм}^3$	$V_{3.4}=0,045690122\text{мм}^3$
№4	$V_{4.1}=0,00421234\text{мм}^3$	$V_{4.2}=0,004456789\text{мм}^3$	$V_{4.3}=0,0045001122\text{мм}^3$	$V_{4.4}=0,036789221\text{мм}^3$
№5	$V_{5.1}=0,00500112\text{мм}^3$	$V_{5.2}=0,0045443278\text{мм}^3$	$V_{5.3}=0,0046001265\text{мм}^3$	$V_{5.4}=0,035679988\text{мм}^3$

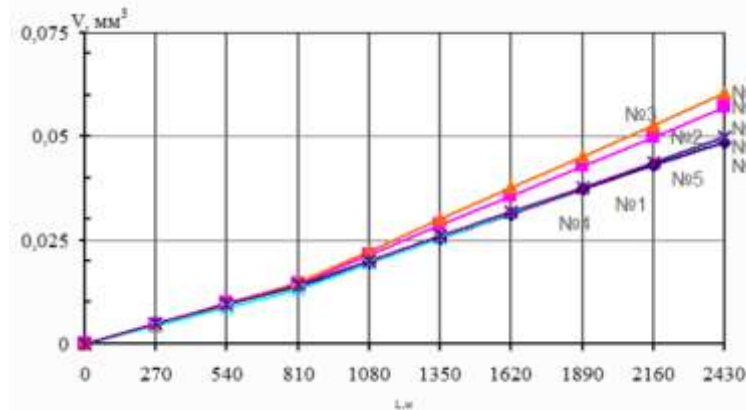


Рисунок 9 – Залежність зношення плоского нерухомого зразка від шляху тертя

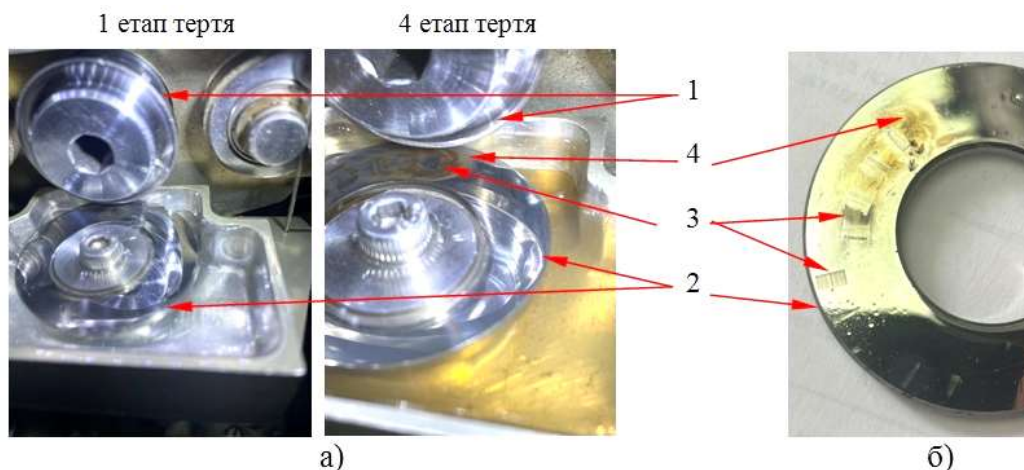


Рисунок 10 – Зображення випробувального вузла тертя ковзання: а) модельний вузол тертя ковзання АСК-01; б) робоча поверхня плоского нерухомого зразка з продуктами зношення; 1 – контрзразок; 2 – плоский зразок; 3 – сліди зносу; 4 – продукти зношування

Висновок

1. Результати дослідження свідчать про те, що трибологічний випробувально-вимірювальний комплекс «НАУ-01» та розроблена експрес методика випробувань дозволяє забезпечити якісну та коректну оцінку протизносних і антифрикційних характеристик паливо-мастильних матеріалів (авіаційний керосин F-35) та присадок до них в умовах лабораторного експерименту з урахуванням властивостей ВС.

Завдяки серії повторних випробувань дослідного зразка палива F-35 та експериментальній оцінці його впливу на трибологічну поведінку робочих поверхонь модельного вузла тертя АСК-01 було охарактеризовано його трибологічні властивості, що в подальшому можуть слугувати «еталоном» для визначення ефективності експериментальних протизносних присадок та розроблюваних біодобавок.

2. За результатами порівняльних випробувань було визначено, що середнє значення загального лінійного зносу робочій поверхні нерухомого зразка в умовах тертя ковзання (сталь ШХ15 по ШХ15) у середовищі дослідного зразка «еталонного» авіагасу досягло 24,89 мкм, при цьому його середня

температура за весь період випробувань підвищилась до максимального значення 36,80С, при рівних зовнішніх умовах випробувань.

3. Відносна похибка виконання досліджень за результатами вимірювання лінійного зношування не перевищувала 5% (розрахункове значення $X = 3,574 \% \pm 0,89$).

4. Оцінка зношування робочих поверхонь плоских зразків за втратою маси (масовий знос) для кожного повторного експерименту, що проводилась до та після випробувань на аналітичних терезах (табл. 2-3, рис. 6-7), незважаючи на достатньо велику точність (0,0001 г.) та відтворюваність, може виявитись недостатньо інформативною для порівняння більш ефективних рідин у подальших дослідженнях. Це зумовлено тим, що вага контрзразка становить 10,0 – 15,0 г., а дослідного нерухомого зразка - 30,0 – 35,0 г. за таких мас похибка вимірювання втрати маси внаслідок зношування сягає $\geq 50\%$.

5. Виконано повторні вимірювання ряду результатів п'яти повторних випробувань за об'ємом зношеного матеріалу сталених зразків пари тертя, де максимальне середнє значення складало $V_{\text{сер}} = 0,053184424$ мм³. Відносна похибка експерименту складає $\leq 7\%$, що є сумарною похибкою засобів вимірювань і похибок методів та прийомів їх використання.

S.V. Boichenko¹, DSc (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

I.O. Shkilnyuk¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8808-3570

R.E. Kostyunik², Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0232-9208

V.O. Korovushkin¹, PhD student, ORCID 0000-0002-7571-7124

K.M. Lutchenko³, ORCID 0009-0001-0480-2591

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

²State University “Kyiv Aviation Institute”

³10 chemmotelogical center of the Ministry of defense of Ukraine

RESEARCH ON THE ANTI-WEAR PROPERTIES OF F-35 AVIATION KEROSENE UNDER SLIDING FRICTION CONDITIONS

The aim is to investigate the wear process of a model sliding contact assembly in the environment of a conventional aviation fuel for comparative analysis with fuel mixtures containing experimental bio-additives and to assess their ability to form protective films that reduce friction force and wear intensity. Methodology: Five repeated four-stage sliding tests were conducted on the NAU-01 complex using the ACK-01 tribometer at axial load 100 N and sliding speed 0.3 m/s. Specimens were ShKh15 steel (HRC 58–63) finished to $Ra \approx 0.02 \mu\text{m}$. Measured parameters included profilometric linear wear, gravimetric mass loss (analytical balance resolution 0.0001 g), worn volume computed from segment geometry, and wear-track morphology by SEM. Results: Mean total linear wear was $24.89 \mu\text{m}$; maximum mean worn volume $\approx 0.053 \text{ mm}^3$. Gravimetric losses were 0.0001–0.0002 g for counter-samples and 0.0003–0.0012 g for flat specimens, indicating limited sensitivity of mass measurements. Bulk contact temperature rose to 36.8 °C. SEM showed mixed adhesive–abrasive mechanisms, micro-adhesion, plastic deformation and secondary tribofilm formation. Measurement uncertainties: linear $\leq 5\%$; volumetric $\leq 7\%$; gravimetric relative errors may exceed 50% at low wear. Conclusions: The four-stage protocol on NAU-01 yields reproducible, sensitive tribological indicators suitable as a reference baseline for evaluating bio-additives. Profilometry and volumetric assessments are recommended as primary metrics for fine differentiation; gravimetric data should be interpreted cautiously. Complementary EDS and XRD analyses are recommended to identify chemical and phase composition of wear products and tribofilms. The obtained reference data may be used to compare effects of experimental bio-additives under identical conditions and to guide selection of promising formulations for engine-scale testing. This article was prepared as part of a grant project of the National Research Fund of Ukraine, “Experimental and analytical foundations of the reliability of dual-use aviation equipment through the improvement of aviation fuel technology in accordance with ASTM and NATO standards” (project No. 0124U004599).

Keywords: F-35 aviation kerosene, tribology, sliding friction, anti-wear properties, profilometry, volumetric wear, secondary structures.

References

1. I. P. Kondor, “Sustainable fuels for gas turbines—a review”, *Sustainability*, т. 17, № 13, с. 6166, jul. 2025. Дата звернення: 18 серп. 2025. <https://doi.org/10.3390/su17136166>.
2. “Alternative fuels data center: Sustainable aviation fuel”. Alternative Fuels Data Center: The go-to resource for advanced transportation fuels and technologies. Date of access: 18 aug. 2025. [Online]. Available at: [https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel#:~:text=Sustainable%20aviation%20fuel%20\(SAF\)%20is,in%20lifecycle%20greenhouse%20gas%20emissions](https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel#:~:text=Sustainable%20aviation%20fuel%20(SAF)%20is,in%20lifecycle%20greenhouse%20gas%20emissions).
3. Boichenko, S., Shkilniuk, I., Iakovlieva, A. (2024). Evolution of the Quality of Jet Fuels: Ukrainian Comparative Review from Traditional to Sustainable Aviation Fuels. In: Boichenko, S., Zaporozhets, A., Shkilniuk, I., Yakovlieva, A. (eds) *Modern Technologies in Energy and Transport II. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 574. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76650-3_13.
4. M. Polajnar, L. Čoga, S. K. Sharma та M. Kalin, “Laboratory tribological screening test methodologies to evaluate the performance of metalworking lubricants for punching stamping”, *Tribol. Int.*, т. 211, с. 110815, nov. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110815>.
5. Iakovlieva, A., Boichenko, S., Vovk, O., Kazimierz, L., Kuszewski, H., & Jakubowski, M. (2015). Experimental study on antiwear properties for blends of jet fuel with bio-components derived from rapeseed oil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(77)), 20–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51682>.
6. D. P. Markov, “Adhesion at friction and wear”, *Friction*, april. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0564-7>.
7. V. A. Vojtov and A. V. Voitov, “Substantiation of a rational program for the running-in of tribosystems”, *Problems Tribol.*, т. 28, № 3/109, с. 6–17, sept. 2023. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-6-17>.
8. Yakovlieva, A., Trofimov, I., Boichenko, S., Kuszewski, H., Lejda, K. (2020). Anti-wear Properties of Jet Fuel with Camelina Oils Bio-Additives. In: Gopalakrishnan, K., Prentkovskis, O., Jackiva, I., Junevičius, R. (eds) *TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_63.
9. S. Domínguez García, M. A. Espinosa-Medina, J. A. Flores Tapia, R. Maya-Yescas, M. A. Pérez-Méndez та B. Castro-Cedeño, “Study of tribological behavior from friction fluctuations in pin-on-disk tests”, *J. Tribol.*, с. 1–14, march. 2025. <https://doi.org/10.1115/1.4068221>.
10. M. Basak, M. L. Rahman, M. F. Ahmed, B. Biswas та N. Sharmin, “The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach”, *J. Alloys Compounds*, т. 895, с. 162694, feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694>.

Надійшла: 15.09.2025
Received: 15.09.2025

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	Імовірісно-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):

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

Використовуючи формулу (6), отримаємо:

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

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 А + (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 А - :

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

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

¹**National 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.iieta.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

О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945В.П. Калінчик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185В.А. Побігійло¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329Д.В. Філянін¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3576-3633Д.В. Яценко¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6702-569X¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕРВАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

В роботі розглядається вирішення задачі інтервального прогнозування процесу електроспоживання. Показано, що ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються такі критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі. Показано, що якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Показано, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, ймовірність отримання абсолютно точного прогнозу є досить малою. В зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу електроспоживання. Запропонована процедура інтервального прогнозування процесу електроспоживання для лінійної моделі, яка заснована на визначенні дисперсії помилки прогнозу.

Ключові слова: електроспоживання, прогнозування, точність, інтервальне прогнозування, дисперсія помилки прогнозу.

Вступ. Для ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються наступні критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі.

Якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою.

Прогнози можна розподілити на дві групи: точкові - це такі прогнози, які фіксують єдине значення прогнозованого фактору; інтервальні - група яка фіксує два та більше можливих показів фактору прогнозу.

При правильно обраній прогнозній моделі, що відповідає детермінованій основі процесу, математичне очікування помилок прогнозу при нульовому математичному очікуванні перешкоди дорівнює нулю. Однак вид апріорно обраної моделі не завжди відповідає дійсності. Крім того, можливі такі зміни коефіцієнтів моделі, при яких може виникнути ситуація, коли за час, поки система забезпечить оцінку нової основи процесу з необхідною точністю, з'являються неприпустимо великі помилки прогнозу [1-4].

Метою роботи є визначення області прогнозованих значень процесу електроспоживання.

Викладення основного матеріалу.

З огляду на те, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, ймовірність отримання абсолютно точного прогнозу є досить малою. У зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу електроспоживання.

$$\hat{W}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq W_j \leq \hat{W}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}, \quad (1)$$

де $D(\delta)$ – дисперсія помилки прогнозу.

Прогнозований процес можна представити моделлю виду

$$x(t) = f(\bar{a}, t) + \varepsilon_t, \quad (2)$$

помилка прогнозу в момент часу $t + \tau$ визначається

$$\delta_\tau(t) = x_\tau(t) - \hat{x}_\tau(t), \quad (3)$$

де $\hat{x}_\tau(t) = f(\hat{a}, t + \tau)$ – точковий прогноз.

У загальному вигляді, помилка прогнозу складається з двох складових

$$\delta_\tau(t) = \delta'_\tau(t) - \delta''_\tau(t), \quad (4)$$

де $\delta'_\tau(t) = f(\bar{a}, t + \tau) - f(\hat{a}, t + \tau)$ – помилка, спричинена неточністю оцінки коефіцієнтів моделі;

$\delta''_\tau(t) = \varepsilon_\tau(\tau)$ – помилка, спричинена наявністю перешкод у точці прогнозу.

В [5] наводиться оцінка коефіцієнтів моделі

$$\hat{a} = F^{-1}BW^2x(t), \quad (5)$$

де $F = BW^2W^TB^T$, B – матриця розміром $n \times N$ (n – число коефіцієнтів a_i ; N – кількість спостережень) значень вектора $\bar{t}$ при різних спостереженнях; W – діагональна матриця ваг розміром $N \times N$.

Матриця коваріацій коефіцієнтів моделі визначається [5]

$$\text{cov}(\hat{a}) = F^{-1}BW^2W^TB^TF^{-1}D(\varepsilon), \quad (6)$$

де $D(\varepsilon)$ – дисперсія перешкоди, оцінку якої можна отримати у вигляді

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - f_j(\bar{a}, t)]^2. \quad (7)$$

Позначивши в (6)

$$F^{-1}BW^2W^TB^TF^{-1} = \text{cov}(k) \quad (8)$$

отримаємо

$$\text{cov}(\hat{a}) = \text{cov}(k) D(\varepsilon). \quad (9)$$

Розкид значень коефіцієнтів моделі є причиною розкиду прогнозованих значень. Коваріаційна матриця прогнозованих значень процесу представлена у вигляді [5]

$$\text{cov}(\hat{x}) = B^TF^{-1}BW^4B^TD(\varepsilon), \quad (10)$$

звідки дисперсія прогнозу в j -й точці дорівнює

$$D(\hat{x}_j) = \bar{t}_j^T \text{cov}(\hat{a}) \bar{t}_j = \bar{t}_j^T \text{cov}(k) \bar{t}_j D(\varepsilon) \quad (11)$$

Як було показано вище (4), помилка прогнозу, крім розкиду прогнозу, буде викликана і наявністю перешкоди в точці прогнозу.

Дисперсія помилки прогнозу $D(\delta)$ дорівнює

$$D(\delta) = D(\hat{x}_j) + D(\varepsilon) = D(\varepsilon)(1 + \bar{t}_j^T \text{cov}(k) \bar{t}_j). \quad (12)$$

Тоді, область прогнозованих значень процесу при наявності перешкоди в точці прогнозу визначається

$$\hat{x}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq x_j \leq \hat{x}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}. \quad (13)$$

Для лінійної моделі елементи матриці (8) визначаються

$$F^{-1} = \frac{\alpha^4}{\beta(1-\beta^4)} \begin{bmatrix} \beta(1+\beta) & \frac{\beta}{\alpha^2} \\ \frac{\beta}{\alpha^2} & \frac{1}{\alpha^2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

$$BW^4B^T = (1-\beta^{2N}) \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\beta^2} & -\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)\beta^2} \\ -\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)\beta^2} & -\frac{\beta^2(1+\beta^2)}{(1-\beta^2)\beta^2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Тоді

$$\text{cov}(k) = \frac{(1+\beta^N)(1-\beta)}{(1+\beta^N)(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 & 1+2\beta-3\beta^2 \\ 1+2\beta+3\beta^2 & 2(1-\beta)^2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

При $N \rightarrow \infty$

$$\text{cov}(k) = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 & 1+2\beta-3\beta^2 \\ 1+2\beta+3\beta^2 & 2(1-\beta)^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Дисперсія прогнозу в j -й точці, що відповідає $\bar{t}_j = t + \tau$, дорівнює

$$D[x_\tau(t)] = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 + \\ +2(1+2\beta-3\beta^2)\tau + \\ +2(1-\beta)^2\tau^2 \end{bmatrix} D(\varepsilon). \quad (18)$$

Введемо позначення

$$B(\tau) = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 + 2(1+2\beta-3\beta^2)\tau + \\ +2(1-\beta)^2\tau^2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

На рисунку1 наведено залежності коефіцієнта $B(\tau)$ від β при різних значеннях τ . З отриманих залежностей видно, що дисперсія прогнозу зростає зі збільшенням інтервалу випередження τ .

З урахуванням (19) перепишемо вираз (18) у вигляді

$$D[x_\tau(t)] = B(\tau)D(\varepsilon). \quad (20)$$

Дисперсія помилки прогнозу з урахуванням перешкоди в точці прогнозу визначається (див. вираз 12)

$$D(\delta) = D(\varepsilon)[1 + B(\tau)]. \quad (21)$$

Для лінійної моделі ($N = 2$) на підставі (7)

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2. \quad (22)$$

Підставивши (22) в (21), отримаємо

Дисперсія помилки прогнозу з урахуванням перешкоди в точці прогнозу визначається (див. вираз 12)

$$\begin{aligned} D(\delta) &= \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2 [1 + B(\tau)] = \\ &= \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2 \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \left[\frac{1 + 4\beta + 5\beta^2}{+2(1 + 2\beta - 3\beta^2)\tau} + \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

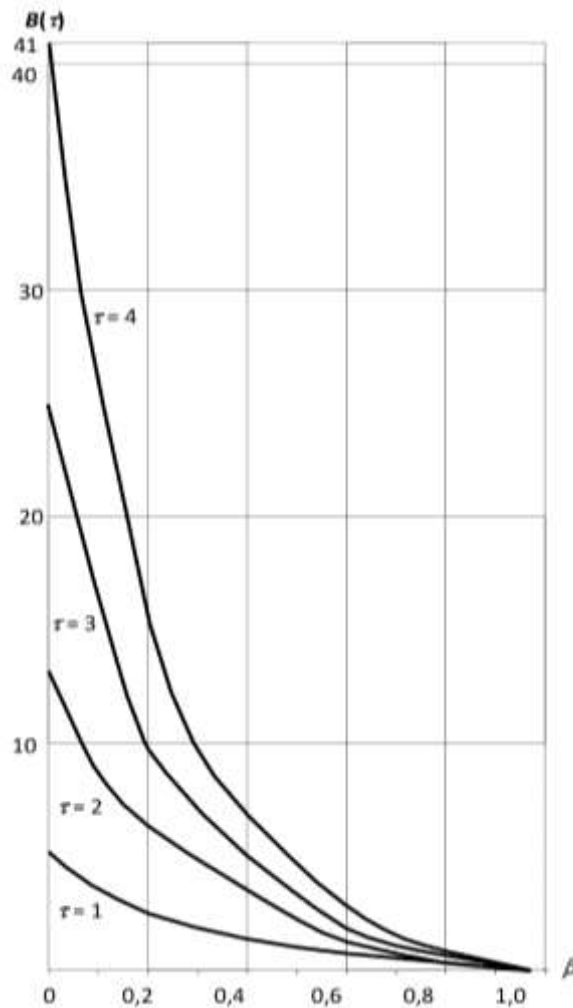


Рисунок1 - Залежність коефіцієнта $B(\tau)$ від β .

Таким чином, отримано вираз для визначення дисперсії помилок прогнозування для лінійної моделі.

Висновок. Для ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються такі критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі. Зазначено, що якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Для підвищення точності прогнозу запропонована процедура інтервального прогнозування процесу електроспоживання для лінійної моделі, яка заснована на визначенні дисперсії помилки прогнозу.

O. Borychenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

V. Pobigaylo¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3576-3633

D. Yatsenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6702-569X

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

INTERVAL FORECASTING OF THE PROCESS OF ELECTRICITY CONSUMPTION

The paper considers the solution of the problem of interval forecasting of electricity consumption. It is shown that the following criteria are used to evaluate the quality of short-term electricity consumption forecasting: forecasting accuracy; interval; resistance to data errors; model adaptability. It is shown that the quality of a forecasting model is largely determined by its accuracy, which is a measure of the adequacy of the future process with its assessment. It is shown that observation of the real process is carried out under conditions of interference, and the probability of obtaining an absolutely accurate forecast is quite low. In this regard, the range of predicted values of the electricity consumption process is introduced. A procedure for interval forecasting of the electricity consumption process for a linear model is proposed, which is based on determining the variance of the forecast error.

Keywords: electricity consumption, forecasting, accuracy, interval forecasting, forecast error variance. .

References

1. S. V. Buryi. Assessment of methods for forecasting electricity consumption by enterprises using the example of a coal mine/ S. V. Buryi, V. V. Khalimov// Scientific Works of VNTU. – 2014. - No. 2. Pp. 1-4.
2. N. Rapatsky. Classification of methods for forecasting electricity consumption/ . N. Rapatsky// Effective use of energy: status and prospects: collection of scientific works of the III All-Ukrainian Student Scientific and Practical Conference (November 9, 2023). – P. 340-342.
3. Storozhilova G. I. Influence of model parameters on the accuracy of electricity consumption forecasting at energy market facilities / G. I. Storozhilova, Ya. M. Demchik // Energy: economics, technologies, ecology: scientific journal. – 2016. – No. 3 (45). – P. 15–21.
4. Boiko S. M. Features of forecasting energy consumption levels in the conditions of distribution electrical networks of iron ore enterprises / S. M. Boiko, I. O. Sinchuk, A. P. Sinolitsy, E. O. Nesmashny, O. V. Dozorenko // Mining Herald. - 2019. - Issue 105. - P. 24-29
5. Determination of the dispersion of errors in the predicted values of the electricity consumption process / Kalinchik V. P., Galileiska A. N., Kalinchik I. V., Litvin T. I.; NTUU “KPI” NDI “Energiya.” – Kyiv, 2010. – 7 p.: ill. – Bibliography: 5 titles. – Ukrainian. – Deposited in the State Scientific and Technical Library of Ukraine on 15.03.2010, No. 2 – Uk 2010..

Надійшла: 04.11.2025

Received: 04.11.2025

РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВОГО НАГРІВАННЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ СТРУМАМИ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Останні десятиріччя характеризуються зростанням електроспоживання у великих містах завдяки висотній забудові нових мікрорайонів та широким впровадженням потужних електроприладів. Також спостерігається тренд до зростання нелінійного навантаження багато в чому через перехід на енергозберігаючі джерела світла – LED лампи. У зв'язку з цим кабельні мережі працюють на межі своєї пропускної здатності, що передбачає роботу з максимально допустимою температурою жил. Визначення температури ізоляції кабельних ліній стає одною з актуальних проблем електроенергетики. Одним із напрямків досліджень є розробка методів визначення залишкового ресурсу ізоляції кабелів, розрахувати який можна на основі даних про температури ізоляції та інших факторів, що істотно впливають на термін служби ізоляційного матеріалу. У статті проведено аналіз можливих способів моніторингу температури ізоляції кабельних ліній електропередачі. Запропоновано математичні співвідношення для розрахунку температури кабельних ліній з використанням технології розподілених вимірювань.

Ключові слова: моніторинг температури кабелю, залишковий ресурс ізоляції кабелю, прогнозуючий захист, рівняння теплового балансу, старіння ізоляції, розподілені вимірювання.

Вступ. Вихід з ладу кабельних ліній, спричинений пробоем ізоляції, є актуальною проблемою електроенергетики. Короткі замикання, що виникають на кабельних лініях, викликають не тільки переривання електропостачання споживача, але також призводять до виникнення перехідних процесів, що може призвести до виходу з ладу електрообладнання споживачів і енергопостачальних організацій.

Пробій ізоляції кабельної лінії може статися з таких причин:

- перенапруга в мережі;
- перевищення допустимого температурного режиму кабелю;
- природне руйнування ізоляції під впливом різних зовнішніх та внутрішніх чинників.

Вибір силових кабельних ліній проводиться за максимально допустимим струмом, який визначає максимально допустиму температуру нагрівання струмопровідного обладнання. При розрахунку вважається, що струм, що протікає по кабельній лінії, має синусоїдальну форму [1]. Це викликає додатковий нагрівання кабелів та скорочення терміну служби їхньої ізоляції. Отже, контроль стану ізоляції необхідний забезпечення надійності електропостачання і скорочення кількості коротких замикань, які викликають суттєві економічні втрати.

Найчастіше для контролю стану ізоляції кабелів цілком достатньо враховувати вплив електричного поля і температури ізоляції. Однак, вплив електричного поля на термін служби ізоляції ще недостатньо і є сферою активних досліджень.

Мета та завдання дослідження. Метою даної публікації є дослідження можливості моніторингу додаткового нагрівання кабельних ліній під впливом вищих гармонік струму без використання датчиків (непрямий моніторинг).

Аналіз літературних джерел. Для контролю стану ізоляції кабелю можуть бути застосовані такі заходи:

- випробування методом відгуку напруги [2];
- випробування кабелю підвищеною напругою наднизької частоти або частоти вище за номінальну [3];
- контроль шляхом аналізу параметрів часткових розрядів [4, 5];
- визначення тангенса кута діелектричних втрат в ізоляції, вимірювання та аналіз зворотної напруги [6];
- методи онлайн моніторингу стану ізоляції кабелів, що дозволяють спрогнозувати пробій в ізоляції [7–10].

Перелічені методи призначені для періодичної перевірки стану ізоляції кабелів, деякі з них мають на увазі відключення кабельної лінії від мережі. Недоліком методів онлайн-моніторингу є необхідність аналізу контрольованих параметрів кваліфікованим персоналом.

У зв'язку з цим на даний час розробляються та впроваджуються автоматичні системи моніторингу стану ізоляції [11, 12]. Запропонований прогнозує захист має на увазі контроль великої кількості впливів, що надаються на ізоляцію, включаючи контроль електричного поля, температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання, радіаційного випромінювання, механічних, хімічних впливів. У більшості випадків для контролю стану ізоляції кабелів достатньо враховувати вплив електричного поля та температури ізоляції.

Розроблювані та впроваджувані системи передбачають контроль температури кабелю за допомогою контактних (термопара) та безконтактних (пірометр) датчиків. Це вимагає доступу до кабельної лінії, що не завжди можливо.

Матеріал і результати досліджень. Будь-яке підвищення температури ізоляції призводить до прискорення старіння і, як наслідок, її руйнування. Швидкість старіння ізоляції визначається формулою Арреніуса [13]. Тому моніторинг температури ізоляції кабелів дозволить розраховувати їхній залишковий ресурс.

Рівняння теплового балансу для кабельної лінії (КЛ) у загальному випадку виглядає так:

$$P_{\text{ж}} \cdot S = T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}$$

де S – тепловий опір шару ізоляції кабелю, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; $P_{\text{ж}}$ – потужність, що розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $T_{\text{с}}$ – температура оточуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ж}}$ – температура струмопровідної жили, $^{\circ}\text{C}$.

Тепловий розрахунок кабелю ведеться для лінійного навантаження. Тобто в розрахунку враховується нагрівання, яке створюється струмом першої гармоніки. За наявності гармонійних складових струму перепишем рівняння теплового балансу наступним чином:

$$(P_{\text{ж1}} + P_{\text{жh}}) \cdot S = T_{\text{ж1}} + \Delta T_{\text{жh}} - T_{\text{с}}$$

де $P_{\text{жh}}$ – потужність, що створюється струмами вищих гармонік і розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $P_{\text{ж1}}$ – потужність, що створюється струмом першої гармоніки і розсіюється струмопровідною жилою кабелю, Вт ; $\Delta T_{\text{жh}}$ – збільшення температури струмопровідної жили кабелю, що створюється струмами вищих гармонік, $^{\circ}\text{C}$.

Приймаючи до уваги, що

$$P_{\text{ж1}} \cdot S = T_{\text{ж1}} - T_{\text{с}}$$

рівняння теплового балансу кабельної лінії для теплового потоку від струмів вищих гармонік виглядає наступним чином:

$$P_{\text{жh}} \cdot S = \Delta T_{\text{жh}} \quad (1)$$

Після увімкнення навантаження температура струмопровідної жили зростає через тривалий час. При змінному навантаженні кабель охолоджується і максимальна температура нагрівання досягається при більшому піковому навантаженні. Зміна значення температури провідника визначається наступною формулою:

$$\theta = \theta_{\text{ст}} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\beta}})$$

де θ – перепад температури жили відносно температури навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{\text{ст}}$ – стале значення перепаду температури струмопровідної жили і оточуючого середовища ($t = \infty$), $^{\circ}\text{C}$; t – час роботи кабелю під навантаженням, с ; β – постійна часу нагрівання.

Значення θ і $\theta_{\text{ст}}$ можна записати наступним чином:

$$\theta = T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}$$

$$\theta_{\text{ст}} = T_{\text{жст}} - T_{\text{с}}$$

При протіканні струмів вищих гармонік значення перепадів температур виглядають так:

$$\theta = T_{\text{ж1}} + \Delta T_{\text{жh}} - T_{\text{с}}$$

$$\theta_{\text{ст}} = T_{\text{жст1}} + \Delta T_{\text{жст h}} - T_{\text{с}}$$

де $T_{\text{жст1}}$ – стала температура струмопровідної жили від втрат потужності від струму першої гармоніки при $t = \infty$, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{\text{жст h}}$ – сталий приріст температури струмопровідної жили від втрат потужності від струмів вищих гармонік, при $t = \infty$, $^{\circ}\text{C}$.

Поточний перепад температури жили, що створюється втратами від струмів вищих гармонік, $^{\circ}\text{C}$:

$$\theta_{\text{h}} = \Delta T_{\text{жh}} - (T_{\text{ж1}} + T_{\text{с}})$$

Сталий перепад температури струмопровідної жили, що створено втратами від струмів вищих гармонік, при $t = \infty$, °C:

$$\theta_{ст h} = \Delta T_{жст h} - (T_{жст1} + T_0)$$

При постійному максимальному розрахунковому навантаженні температура кабелю становить, °C:

$$T_{ж1} = T_{жст1}$$

Тоді попередні вирази для перепадів температур струмопровідної жили від втрат потужності від струмів вищих гармонік, будуть мати такий вигляд, °C:

$$\theta_h = \Delta T_{ж h} - (T_{жст1} + T_0)$$

та

$$\theta_{ст h} = \Delta T_{жст h} - (T_{жст1} + T_0)$$

Складовою цих рівнянь $(T_{жст1} + T_0)$ – це початкова температура жили. Для спрощення приймаємо її рівною нулю:

$$T_{жст1} + T_0 = 0$$

Таким чином додаткове збільшення температури струмопровідної жили від втрат потужності від протікання струмів вищих гармонік, °C:

$$\Delta T_{ж h} = \Delta T_{жст h} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \quad (2)$$

де t_h – час протікання по кабелю струмів вищих гармонік, с.

Оскільки в рівнянні теплового балансу (1) змінна часу не приймає участі, то запишемо:

$$\Delta T_{жст h} = P_{ж h} \cdot S$$

Тоді (2) можна записати наступним чином:

$$\Delta T_{ж h} = P_{ж h} \cdot S \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \quad (3)$$

Енергія гармонійних складових, що споживає кабельна лінія за час t_h :

$$W_{ж h} = t_h \cdot P_{ж h}$$

Тоді (3) приймає наступний вигляд:

$$\Delta T_{ж h} = W_{ж h} \cdot S \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_h}{\beta}}\right) \cdot \frac{1}{t_h} \quad (4)$$

Таким чином збільшення температури кабельної лінії від впливу гармонійних складових струму залежить від спожитої електроенергії гармонійних складових та часу протікання по ній струмів гармонійних складових:

$$\Delta T_{ж h} = f(W_{ж h}, t_h)$$

При здійсненні вимірювань на реальних об'єктах в якості величини t_h приймається тривалість звітного періоду і, відповідно, спожита за цей період енергія вищих гармонік W_h . Тривалість звітного періоду – це сталі значення. Тому з (4) слідує, що збільшення температури кабельної лінії прямо пропорційне спожитій енергії гармонійних складових:

$$\Delta T_{ж h} = f(W_{ж h}).$$

Висновки:

- приріст температури кабельної лінії прямо пропорційний енергії гармонійних складових, що споживає кабельна лінія за звітний період;
- використання розподілених вимірювань дозволяє контролювати додатковий нагрів кабельної лінії та, коригувати термін служби кабелю та планувати роботи для його заміни.

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0009-0004-2113-3600

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

CALCULATION OF ADDITIONAL HEATING OF CABLES BY HIGH HARMONICS CURRENTS

Recent decades have been characterized by an increase in electricity consumption in large cities due to the high-rise construction of new residential areas and the widespread introduction of powerful electrical appliances. There is also a trend towards an increase in nonlinear loads, largely due to the transition to energy-saving light sources - LED lamps. As a result, cable networks operate at their limits, which means operating at the maximum permissible conductor temperature. Determining the insulation temperature of cable lines is becoming a pressing issue in the electric power industry. One of the direct investigations is the development of methods for calculating the residual lifetime of cable insulation, which can be determined based on data on the insulation temperature and other factors that clearly influence the lifetime of insulating material. The article analyzes possible methods of monitoring the insulation temperature of power transmission cable lines. Mathematical equations are proposed for calculating the temperature of cable lines using distributed measurement technology.

Keywords: heat balance equation, insulation aging, cable temperature monitoring, lifetime of cable insulation, predictive protection, , distributed measurements.

References

- 1.V. Voloshko, D. V. Filyanin. "Detection and localization of power quality disturbances based on Fast Fourier Transform and Discrete Fourier Transform", *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, № 3, pp. 87–94, 2017. doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2017.117380>
- 2.Performing Isolation Tests on High Voltage Power Supplies [Online]. Available: <https://www.advancedenergy.com/getmedia/5b0fc8ed-5526-497b-a34e-e418bfa98ca7/en-hv-performing-isolation-tests-high-voltage-power-supplies-application-note.pdf>
- 3.VLF AC Testing [Online]. Available: https://hvinc.com/wp-content/uploads/2021/02/VLF_TD_2016_Blue-Slides.02.23.21.pdf
- 4.S. Arumugam, M. Bogaczyk, S. Gorchakov, R. Kozakov and K. -D. Weltmann, "Dielectric and partial discharge investigations on aged medium voltage underground power cables," *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Ann Arbor, MI, USA, 2015, pp. 306-310, doi: 10.1109/CEIDP.2015.7352119
- 5.P. Sreejaya, "Study of Solid Dielectric Degradation Using Partial Discharge Test," *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec, QC, Canada, 2008, pp. 408-412, doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772853
- 6.P. A. Muntakim, J. Zhang, S. Zhang and B. T. Phung, "Dielectric Dissipation Factor Measurement of Power Equipment under Distorted Excitation Voltage," *2021 International Conference on Smart-Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, Sanur, Bali, Indonesia, 2021, pp. 91-95, doi: 10.1109/ICSGTEIS53426.2021.9650374
- 7.Li, Hongbo & Shao, Huawei & Niu, Sen. "Online Monitoring Technology for Cable Insulation in Distribution Networks Based on Line Conduction Characteristics", *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, 17, 2024, pp. 1-17. doi: 10.4018/IJITSA.352598
- 8.Y. Wu, Y. Yang, Z. Wang and P. Zhang, "Online Monitoring for Underground Power Cable Insulation Based on Common-Mode Signal Injection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 7, pp. 7360-7371, July 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3102410
- 9.L. A. Renforth, R. Giussani, M. T. Mendiola, and L. Dodd, "Online partial discharge insulation condition monitoring of complete high-voltage networks," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, 2019, pp. 1021–1029. doi: 10.1109/TIA.2018.2866983
- 10.S. Mousavi Gargari, P. A. A. F. Wouters, P. C. J. M. van der Wielen and E. F. Steennis, "Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 3, 2011, pp. 868-877. doi: 10.1109/TDEI.2011.5931076
- 11.Sang Bin Lee, K. Younsi and G. B. Kliman, "An online technique for monitoring the insulation condition of AC machine stator windings," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, 2005, pp. 737-745. doi: 10.1109/TEC.2005.853760
12. Insulation monitoring: The concept [Online]. Available: <https://www.bender.de/en/know-how/technology/it-system/insulation-monitoring-the-concept>
13. Arrhenius Equation [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/arrhenius-equation#:~:text=The%20Arrhenius%20equation%2C%20k%20=%20A,85%20%C2%5B38%5D>.

Надійшла: 30.10.2025

Received: 30.10.2025

КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Дослідження висвітлює проблематику збільшення кількості активних споживачів в об'єднаних енергетичних системах, що працюють в умовах ринку електричної енергії. Робота направлена на вирішення завдань пов'язаних з низькою прогнозованістю поведінки активного споживача, його впливі на загальну мережу при ефективному впровадженні економічних стимулів.

Запропоновано методіку керування установками активного споживача або агрегатора, що може вносити зміни до поведінкової стратегії профіля навантаження з врахуванням економічних чинників, технічних обмежень відповідно до поточного стану енергетичної системи.

Розроблено алгоритм керування на основі гібридного методу логічного програмування обмежень з лінеаризацією функцій, що дозволило отримати оптимальні результати керування енергетичними потоками з врахуванням ринкових і системних обмежень.

При проведенні моделювання використано профілі споживання електроустановок промислового споживача та цінові показники електричної енергії на ринку «на добу наперед». В процесі моделювання було визначено різні стратегії сценарного управління електроустановками, що мають переважне застосування в сучасному підході до керування обладнанням активного споживача.

Ключові слова: активний споживач, промисловий споживач, самовиробництво, власне споживання, керування установками, ринок електричної енергії, відновлювальні джерела енергії, установки зберігання енергії.

Вступ. Розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в країнах ЄС показує значний приріст, як на боці генеруючих підприємств, так і в мережах споживачів електричної енергії [1] і українські підприємства також підтримують цей тренд, зокрема під тиском глобального здорожчання енергоносіїв та нестабільності роботи мереж в наслідок ворожих обстрілів інфраструктури. В черні 2023 року було прийнято ЗУ 3220-ІХ [2] що надав споживачам з наявними ВДЕ та УЗЕ в своїх мережах, отримувати статус активного споживача та проводити свою діяльність в умовах ринку електричної енергії. Активний споживач є невід'ємною частиною глобальної тенденції до реформування сталих моделей енергетичних мереж до сучасної розподіленої генерації [3] та має ряд переваг для електричних мереж в яких він функціонує [4]. Недосконалість нормативно-правового забезпечення діяльності активних споживачів та механізмів щодо їх взаємодії з суб'єктами ринку електроенергії не набули широкого застосування через ряд процедурних факторів. Одним із застережень є не прогнозована їх участь в керуванні навантаженням та різка змінювати режимів споживання електроенергії. В свою чергу необхідності участі активних споживачів в розвитку електроенергетики є одним із сучасних перспективних напрямків і світових трендів.

Мета та завдання. Розробити методіку динамічного керування установками активних споживачів, що працюють в умовах ринку електричної енергії. Для досягнення мети врахувати економічні та експлуатаційні критерії використання ВДЕ та УЗЕ за умов прогнозованості графіка електричних навантажень активного споживача.

Матеріал і результати досліджень.

Активний споживач як суб'єкт ринку електричної енергії, має можливість набувати ролі як покупця, так і продавця на ринку, за наявності в його мережах генеруючих установок або УЗЕ [5]. На рис. 1 показано комплексну схему приєднання установок до мереж активного споживача.

Таким чином структура установок активного споживача може набувати достатньо складних форм, з використанням УЗЕ як буферу накопичення електричної енергії, резервування всього або часткового навантаження споживача за умов приєднання генеруючих установок на базі ВДЕ та на різних рівнях системи електропостачання об'єкта. Також відповідно до проведених досліджень [6], кожен з цих елементів може бути як у власності споживача, так і у власності третіх осіб. Сучасне обладнання сонячних електростанцій, а саме інвертори надають можливості створення різних сценаріїв керування енергетичними потоками, що відображені в таблиці 1.

Наведені сценарії в Таблиці 1 дозволяють налаштувати обладнання для керування потоками генерації/накопичення/розряду/імпорту/експорту електричної енергії, за розкладом погодинним та/або за днями тижня. На практиці споживач оцінює періоди власного попиту, генерації, ринкові ціни закупівлі та

продажу електроенергії та створює свій сценарій функціонування обладнання для досягнення своїх технічних та економічних цілей.

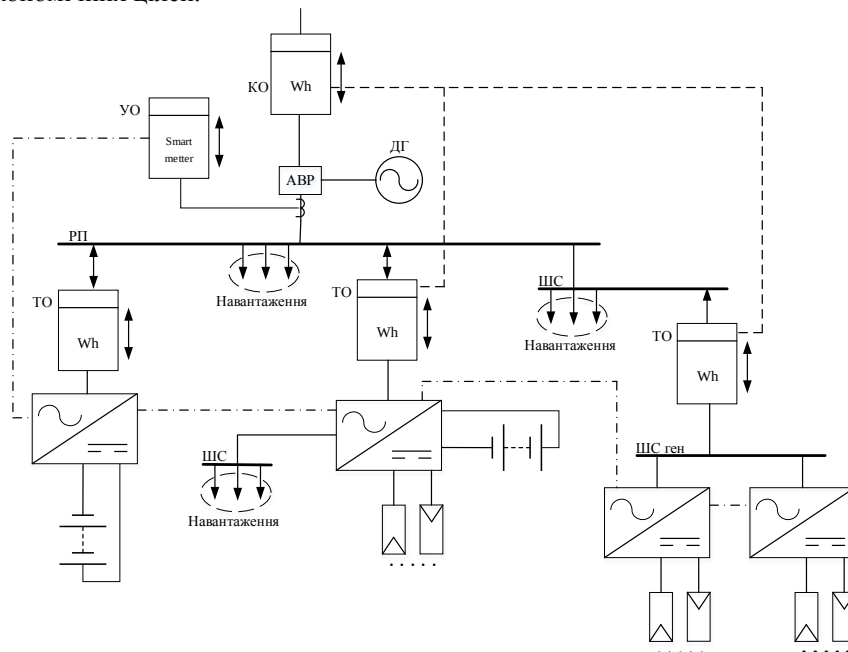


Рисунок 1 - Комплексна схема приєднання установок до мереж активного споживача

Таблиця 1 - Сценарії керування енергетичними потоками активного споживача

Сценарій	Енергетичні потоки			
	Заряд УЗЕ	Розряд УЗЕ	Експорт	Імпорт
1) Bc^S/Gs^S	Лише від ВДЕ (І пріоритет)	-	Лише з ВДЕ (ІІ пріоритет)	-
2) Bc^{S+G}	З ВДЕ та мережі	-	-	Лише в УЗЕ
3) Gs^S/Bc^S	Лише від ВДЕ (ІІ пріоритет)	-	Лише з ВДЕ (І пріоритет)	-
4) Gb^{C+B}/Bc^G	Лише з мережі (ІІ пріоритет)	-	-	На навантаження та в УЗЕ (І пріоритет)
5) Gb^C	-	-	-	Лише на навантаження
6) Bd^C/Gb^C	-	Лише на навантаження (І пріоритет)	-	Лише на навантаження (ІІ пріоритет)
7) Bd^{C+G}/Gs^B	-	На навантаження та експорт (І пріоритет)	Лише з УЗЕ (ІІ пріоритет)	-

Примітка. Назви сценаріїв містять позначення та індекси. Позначення відповідають джерелу живлення, а індекси дозволяють цілям їх використання: S (solar), B (battery), G (grid), b (buy), s (sell), c (charge), d (discharge).

Проте в умовах сучасного ринку електричної енергії, який характеризується високою волатильністю цін, що можуть різко відрізнятись від часу доби, такий метод керування не є достатньо ефективним, адже очікування від поведінки ринку можуть не справдитись. Визначенні статичні сценарії налаштування скерують надлишки електроенергії на експорт в години низької ціни або ж може відбутись режим заряджання УЗЕ в години з дорогою електричною енергією. Для уникнення таких ситуацій запропоновано алгоритм керування, що враховує ринковий сигнал, а вже потім оцінює всі технічні обмеження активного споживача та його обладнання та знаходить найкращу конфігурацію розподілу наявних енергетичних потоків (рис. 2).

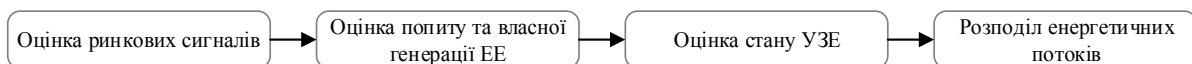


Рисунок 2 – Порядок прийняття рішення активного споживача в умовах ринку електричної енергії

Для реалізації роботи алгоритму (табл. 2) було використано метод логічного програмування обмежень (CLP) з лінеаризацією розрахунків, що дозволить отримувати результати послідовного прийняття рішень у кожному часовому інтервалі без прогнозування майбутніх станів системи та буде придатним для участі активного споживача на усіх сегментах спотового ринку електричної енергії. Для дослідження були визначені наступні вихідні дані до моделі:

- Економічні: тариф ОСР, тариф ОСП, погодинні ціни РДН, ціни прийняття рішення заряду та розряду;
- Нормативно-правові: договірна потужність споживача, модель функціонування з ринком;
- Технічні: ГЕН споживання, графік потенційної генерації ВДЕ, параметри УЗЕ, початковий стан УЗЕ.

Таблиця 2 – Математичне представлення алгоритму.

$T_{EE}(t) \geq T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) \leq -0.5P_{dec}$		
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{13E}(t) = MAX[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) - 0.5P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$	$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) + P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) - P_{13E}(t)$	$P_{13E}(t) = MAX[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) - 0.5P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$T_{EE}(t) > T_{EE}^{up} > T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$		$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) + P_{13E}(t) \leq -0.5P_{dec}$		$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{sup}(t) = P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) + P_{13E}(t)$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		
$T_{EE}(t) \leq T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{dec} + P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$		$P_{13E}(t) = MIN[P_{dec} + P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) - P_{13E}(t) \leq -0.5P_{dec}$		$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{sup}(t) = P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) - P_{13E}(t)$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		

Для моделювання було використано дані споживання промислового споживача з волатильним рівнем навантаження між сезонами, з наявними УЗЕ на генерацією з фотоелектричної установки. Проведено моделювання для режимних днів всіх сезонів. Використана модель самовиробництва. Проведено порівняння роботи алгоритму динамічної зміни сценаріїв роботи установок з статичним сценарним налаштуванням. Результати сформованих графіків електричних навантажень активного споживача наведені на рисунку 2.

Як визначено з сформованих графіків, алгоритм динамічного керування має зміщені піки навантаження споживача симетричні мережі також зменшується величина піків у всіх випадках, окрім літнього графіку (рис.2(г)), де величини піків співпадають. Аналіз режимних характеристик графіків (табл. 3) показує переважно підвищення стабільності та прогнозованості поведінки навантаження активного споживача, окрім зимового сезону, що може бути пов'язано з особливістю самого ГЕН споживача, поведінкою ціни на РДН, а також активністю генерації з ВДЕ в цей сезон.

Також стратегія динамічного керування показала кращі економічні результати для активного споживача (табл. 4). Такий ефект проглядається для діб всіх сезонів, що відображається на загальному річному фінансовому результаті зобов'язань активного споживача за імпортовану електричну енергію. Також табл. 4 відображає економічні обмеження динамічної моделі, відносно яких відбувалось прийняття рішення щодо вибору сценарію в конкретний момент часу, де ціна прийняття рішення заряду та розряду.

Висновки

В результаті проведеного дослідження встановлено, що використання методики на базі ринково-орієнтованого алгоритму керування установками активних споживачів має позитивний ефект як на фінансові показники діяльності його на ринку електричної енергії, так і на режимні характеристики графіків електричних навантажень, які вказують на більшу ступінь прогнозованості його поведінки.

Особливість застосованого керування на основі прийняття найкращого рішення в даний момент часу відкриває можливість для активних споживачів та їх агрегаторів. Застосування даного підходу можливе на всіх спотових сегментах ринку електричної енергії, що є ефективним інструментом для керування наявними потоками електричної енергії активного споживача.

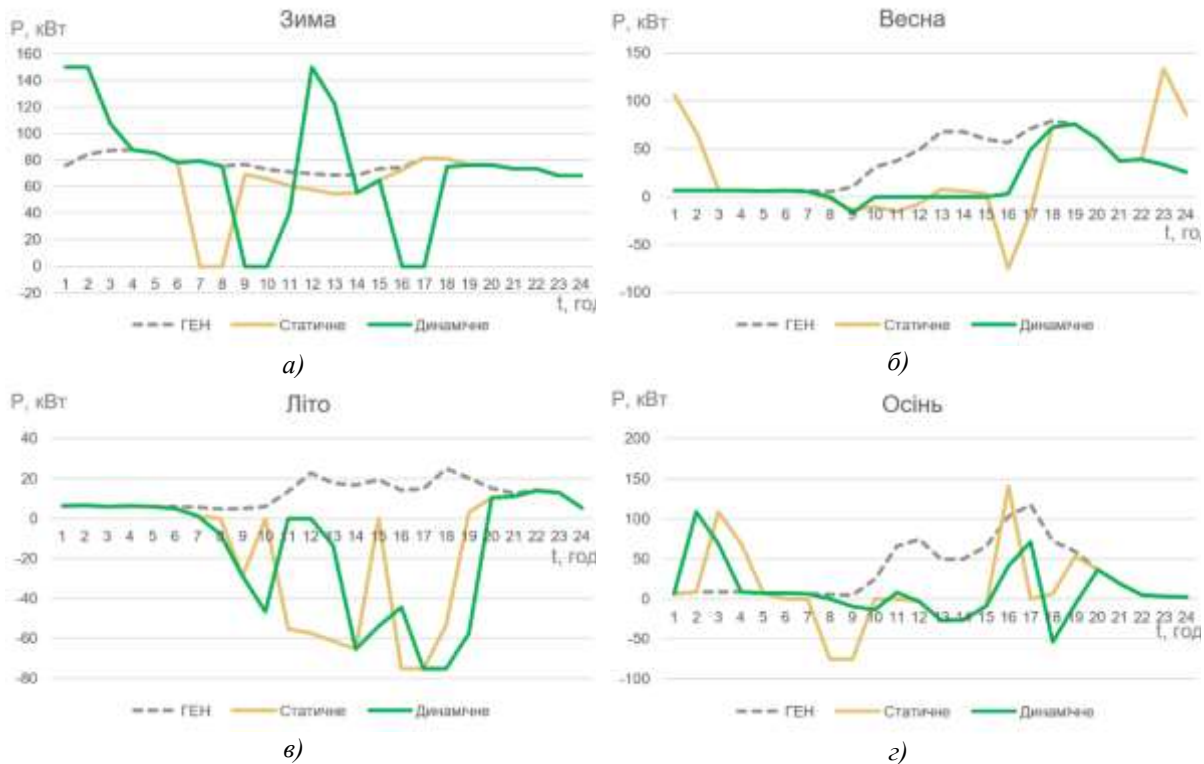


Рисунок 2 – Результати сформованих графіків навантаження активного споживача при роботі з використанням статичного та динамічного сценарного керування для періодів: зима (а), весна (б), літо (в), осінь (г).

Таблиця 3 – Режимні характеристики графіків навантаження за статичного та динамічного сценарного керування

		Рср, кВт	Рмакс, кВт	Кз, в.о.	Медіана, кВт	СКВ, кВт	Квар, в.о.
Зима	Статичне	73,179	150,000	0,488	72,983	32,559	0,445
	Динамічне	76,584	150,000	0,511	75,831	46,224	0,604
	Δ	4,45%	0,00%	4,45%	3,75%	29,56%	26,28%
Весна	Статичне	24,312	133,608	0,182	6,455	46,131	1,897
	Динамічне	17,645	75,699	0,233	6,230	24,867	1,409
	Δ	-27,42%	-76,50%	21,94%	-3,62%	-46,09%	-25,72%
Літо	Статичне	-15,745	13,964	-1,128	2,113	31,706	-2,014
	Динамічне	-15,745	13,964	-1,128	0,521	30,129	-1,914
	Δ	0,00%	0,00%	0,00%	-75,34%	-4,97%	-4,97%
Осінь	Статичне	10,445	141,187	0,074	2,971	46,287	4,431
	Динамічне	10,445	108,503	0,096	5,577	33,787	3,235
	Δ	0,00%	-30,12%	23,15%	87,72%	-36,99%	-36,99%

Таблиця 4 – Економічні результати моделювання

	Зима (1 доба)	Весна (1 доба)	Літо (1 доба)	Осінь (1 доба)	Рік
Статичне, грн	-13 486,57	-3 607,01	563,22	-2 221,32	-1 687 651,82
Динамічне (найкращий), грн	-13 117,67	-2 670,66	1 199,37	-1 950,55	-1 488 555,46
Цінове обмеження для динамічного керування (Цпр.заряд...Цпр.розряд), грн	7,5...9,53	3,5...5,53	3,0...5,3	7,0...9,03	-
Ефект, %	2,74	25,96	53,04	12,19	11,80

A. Pystovyi¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0007-9774-4688

Y. Veremiichuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MANAGEMENT OF ENERGY FLOWS OF ACTIVE CONSUMERS IN THE ELECTRICITY MARKET

The study highlights the issue of increasing the number of active consumers in integrated energy systems operating in the electricity market. The work is aimed at solving problems related to the low predictability of active consumer behavior and its impact on the overall network with the effective implementation of economic incentives.

A methodology is proposed for controlling active consumer or aggregator installations that can make changes to the behavioral strategy of the load profile, taking into account economic factors and technical constraints in accordance with the current state of the energy system.

A control algorithm has been developed based on a hybrid method of logical programming of constraints with linearization of functions, which made it possible to obtain optimal results for controlling energy flows, taking into account market and system constraints.

The simulation used the consumption profiles of industrial consumer electrical installations and electricity price indicators on the day-ahead market. During the simulation, various scenario management strategies for electrical installations were identified, which are predominantly used in the modern approach to managing active consumer equipment.

Keywords: active consumer, industrial consumer, self-production, own consumption, facility management, electricity market, renewable energy sources, energy storage facilities.

References

1. Bogoroditska G. E., Voitov S. G., Dychenko S. Yu. Analysis of trends in the development of renewable energy in the EU. Change management and innovation. 2025. No. 14. P. 186–191. DOI:10.32782/cmi/2025-14-30.
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EU and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EU and 2006/32/EU : European Union Directive of 25.10.2012 no. 2012/27/EU: as of 1 January 2021. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text (date of access: 20.10.2025).
3. Law of Ukraine No. 3220-IX of 30.06.2023 "On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Restoration and "Green" Transformation of the Energy System of Ukraine" URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text> (date of access: 20.10.2025).
4. Law of Ukraine No. 555-IV "On alternative energy sources" URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (date of access: 08.10.2025).
5. Pustovyi A. M., Veremiychuk Yu. A. Analysis of mechanisms for stimulating the development of small-scale distributed generation on the side of household consumers in market conditions. Energy and Automation. 2025. No. 1. P. 78–89. DOI: 10.31548/energiya1(77).2025.078.
6. Kozachuk O. I. Intellectualization of electricity distribution networks with photovoltaic power plants and active electricity consumers.: dissertation of PhD in Technical Sciences : 141. Vinnytsia, 2024. 150 p.

Надійшла: 08.12.2025

Received: 08.12.2025

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.31

DOI 10.20535/1813-5420.4.2025.341349

А.В. Карпенко¹, PhD студент, ORCID 0009-0004-5787-4750,

Б.В. Розсоха², ORCID 0009-0004-1560-0401

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Запорізька міська рада

ПРІОРИТЕТНІ СЕКТОРИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ В МУНІЦИПАЛІТЕТАХ

У статті досліджено актуальні проблеми енергетичного планування в муніципалітетах України. Акцентовано увагу на важливості енергетичного, моніторингу та контролю за використанням енергетичних ресурсів для забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки. Виконано аналіз затвердженої Міністерством розвитку громад, територій та інфраструктури України методики розроблення місцевих енергетичних планів, а також підтримки та моніторингу реалізації таких планів з боку Державного агентства з питань енергоефективності та енергозбереження України. Практичний аспект дослідження базується на аналізі енергоспоживання муніципальних об'єктів міста Запоріжжя, що дозволяє оцінити результативність впроваджених енергоефективних заходів та їх вплив на зниження споживання енергоресурсів. Бібл. 4, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: енергетична ефективність, енергетичний менеджмент, енергомоніторинг, енергоспоживання, енергетичне планування, муніципалітет, сталий розвиток.

Вступ. Нагальні виклики сьогодення, зокрема, скорочення використання викопного палива та запобігання змінам клімату вимагає від органів державної влади та місцевого самоврядування запровадження продуктивних механізмів раціонального та ощадливого природокористування, зокрема, ефективного енерговикористання. Муніципалітети, як основні адміністративні одиниці, мають значний потенціал для підвищення рівня енергетичної ефективності, скорочення споживання енергоресурсів та зменшення шкідливого впливу на довкілля. Саме тому впровадження в муніципалітетах систем енергетичного менеджменту (СЕНМ) є одним з пріоритетних завдань у контексті їх сталого розвитку та досягнення національних і міжнародних цілей у сфері енергетичної безпеки та кліматичної нейтральності.

Однією з найвагоміших складових енергетичного менеджменту і стратегії ефективного використання енергетичних ресурсів на рівні муніципалітетів є енергетичне планування, моніторинг та контроль використання енергетичних ресурсів, що дозволяє відстежувати поточні рівні енергоспоживання в режимі, близькому до реального часу, і сприяє своєчасному виявленню та усуненню нераціональних витрат енергії, а також є основою для формування інформаційного забезпечення завдань управління енерговикористанням. Пріоритетні напрями енергомоніторингу в муніципалітетах охоплюють не лише технологічні аспекти, а й організаційні, економічні та соціальні. Зокрема, це передбачає планування процесів збирання, оброблення та аналізу даних про енерговикористання, автоматизацію та інтеграцію із системами управління смарт-містами, підвищення енергоефективності будівель, перехід на електротранспорт, управління вуличним освітленням тощо, а також оцінку та зменшення викидів парникових газів. Енергетичне планування має важливе значення не лише для економії коштів, але й для досягнення цілей сталого розвитку та забезпечення екологічної безпеки на місцевому рівні.

Метою досліджень є визначення пріоритетних секторів енергетичного планування в муніципалітетах з урахуванням економічних показників та рівнів енерговикористання муніципальних об'єктів, що має забезпечити ефективне управління енергетичними ресурсами та підтримку сталого розвитку на місцевому рівні.

Матеріали і результати дослідження. З огляду на важливість енергетичної ефективності в муніципальних структурах, важливим кроком є Методика розроблення місцевих енергетичних планів, затверджена наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 21 грудня 2024 року № 1163 (далі – Методика) [1]. Цей нормативно-правовий документ надає муніципалітетам чіткі

інструкції для розробки енергетичних планів, що сприятиме не лише підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів, а й зниженню витрат на енергопостачання, зменшенню негативного впливу на довкілля та забезпеченню сталого розвитку місцевих громад.

Методика [1] передбачає три головні напрями впливу муніципалітетів у сфері енерговикористання: **управлінський, регулювання та фінансування** енергетичних проєктів, що дозволяє місцевим органам самоврядування розробити структурований план дій, який включає оцінку поточного енергоспоживання в різних секторах, визначення потенціалу для покращення енергоефективності, а також розробку конкретних заходів для скорочення енергетичних витрат, зокрема, модернізацію інфраструктури, впровадження нових енергозберігаючих технологій та інтеграцію систем енергомоніторингу, що забезпечують регулярний контроль за використанням енергії на всіх муніципальних рівнях.

За [1] визначається рівень впливу міської ради та її виконавчих органів на кожен сектор енергоспоживання за трьома головними напрямками. Першим напрямом є **управлінський вплив**, який полягає у прийнятті управлінських рішень у відповідному секторі. Другим напрямом є **регуляторний вплив**, що охоплює розробку та впровадження регуляторних актів, зокрема, встановлення тарифів на комунальні послуги та інші регулювання. Третім напрямом є **фінансовий вплив**, який проявляється у забезпеченні операційної діяльності та розвитку сектору через виділення коштів з місцевого бюджету для фінансування відповідних заходів (рис. 1).



Рисунок 1. - Основні напрями впливу на процеси енергетичного планування в муніципалітетах

Управлінський вплив органу місцевого самоврядування (ОМС) на діяльність у секторі може бути прямим чи опосередкованим. ОМС можуть чинити **безпосередній управлінський вплив** на операційну та інвестиційну діяльність у секторі, що передбачає прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури, реалізації великих проєктів, визначення пріоритетних напрямів діяльності, а також управління комунальними підприємствами. ОМС також можуть безпосередньо впливати на функціонування суб'єктів господарювання через організаційні рішення. У випадку **опосередкованого впливу** ОМС відіграє обмежену, але важливу роль, що проявляється в підтримці проєктів державно-приватного партнерства, наданні земельних ділянок для бізнесу та наданні фінансової підтримки через бюджетні кошти. ОМС також здійснюють контроль за витратами та ефективністю використання коштів на різні інфраструктурні та соціальні проєкти. Якщо ж ОМС не чинять жодного прямого або опосередкованого впливу на управлінські рішення в енергетичному секторі, суб'єкти господарювання діють незалежно від місцевої влади, що несе ризики неефективного використання ресурсів, відсутності координації та виникнення конфліктів інтересів, і тягне за собою зниження інвестиційної привабливості, соціальну напруженість і можливість корупційних зловживань.

Регуляторний вплив ОМС можуть чинити **прямий регуляторний вплив** через регулювання діяльності суб'єктів на місцевому рівні, що охоплює встановлення норм і стандартів, які регулюють господарську діяльність, діяльність у сфері ліцензування і тарифної політики на комунальні послуги, проведення конкурсів на визначення надавачів послуг, а також контроль за умовами доступу до місцевих інженерних мереж. **Опосередкований регуляторний вплив** чиниться через можливість встановлювати місцеві податки та збори, які можуть суттєво впливати на діяльність бізнесу в регіоні. Крім того, ОМС здійснюють контроль за дотриманням законодавчих норм, застосовують санкції за порушення екологічних та інших регуляторних вимог. Якщо **вплив відсутній**, ОМС не мають повноважень впливати на діяльність підприємств чи регулювати їх через місцеві закони або регулювання. У такому випадку суб'єкти господарювання не залежать від місцевих органів влади в частині регуляторних вимог.

Фінансування сектору ОМС можуть чинити **прямий фінансовий вплив** через фінансування поточних і капітальних витрат, а також оплати наданих послуг за рахунок коштів місцевого бюджету. Це охоплює реалізацію важливих соціальних та інфраструктурних проєктів, а також надання фінансової

підтримки місцевим підприємствам та установам для забезпечення стабільності в роботі сектору. У разі **опосередкованого фінансового впливу**, місцевий бюджет може фінансувати програми, які стимулюють розвиток сектору, як от субсидювання капітальних вкладень або поточних витрат через дотації та внески до статутного капіталу комунальних підприємств. Також можливе надання місцевих гарантій або кредитів для підприємств, що здійснюють важливі інвестиції в інфраструктуру чи інші сфери. Якщо **вплив відсутній**, ОМС не здійснюють фінансування поточних чи капітальних витрат для суб'єктів господарювання в секторі. Місцевий бюджет не передбачає коштів на співфінансування витрат бізнесу або проєктів, що потребують державної підтримки.

Практичне застосування [1] несе муніципалітетам низку переваг. По-перше, це дозволяє забезпечити комплексний підхід до управління енергетичними процесами в межах громади, що підвищує ефективність використання енергетичних ресурсів. По-друге, завдяки чітко визначеним регуляторним вимогам і механізмам фінансування, місцеві органи мають змогу залучати фінансові ресурси для реалізації енергоефективних проєктів, що охоплює як державне, так і міжнародне фінансування, та дозволяє громадам впроваджувати інноваційні технології і практики без значних фінансових витрат з бюджету. Окрім того, методика передбачає залучення громадян до участі в підвищенні рівня енергоефективності через прозорі механізми моніторингу і зворотного зв'язку, що, в свою чергу, призводить до зниження загальних витрат на енергію та покращення екологічної ситуації на місцевому рівні.

Згідно з Методикою [1] передбачено, що Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності) здійснює інформаційно-консультативне забезпечення сільських, селищних, міських рад, їх виконавчих органів, обласних рад, обласних державних адміністрацій, інших заінтересованих сторін з питань розроблення та виконання місцевих енергетичних планів (МЕП), в тому числі надає пояснення щодо збору та аналізу інформації, підготовки планів, поширює найкращі практики підготовки МЕП.

Окрім того, Держенергоефективності здійснює моніторинг результатів реалізації МЕП та надає відповідні звіти про прогрес у їх виконанні.

Для досягнення визначеної мети було проведено аналіз даних енергоспоживання муніципальних об'єктів міста Запоріжжя, населення якого станом на 1 січня 2022 року налічувало 710,052 тис. осіб, а станом на 1 червня 2025 року — 624,456 тис. осіб. З урахуванням 153,268 тис. внутрішньо переміщених осіб, зареєстрованих у місті, загальна чисельність населення становить 777,724 тис. осіб, що дозволяє оцінити використання енергетичних ресурсів на місцевому рівні та визначити вплив реалізованих у цей період енергоефективних заходів на зниження енергоспоживання та підвищення рівня енергоефективності муніципалітету.

У дослідженні проаналізовано моніторинг використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) бюджетними установами міста Запоріжжя у 2019–2023 роках, охоплено понад 550 об'єктів, які підключені до автоматизованого енергомоніторингу на базі платформи (AIC) Umuni [2]. Відповідно до отриманих результатів визначено сектори енергетичного планування, що є основою для подальшого управління енерговикористанням. У табл. 1 наведено динаміку енергоспоживання за минулі п'ять років бюджетними установами, які забезпечено фінансуванням з бюджету м. Запоріжжя.

Таблиця 1. Динаміка енергоспоживання бюджетних установ м. Запоріжжя

№ з/п	Вид енергоресурсу	Споживання				
		2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2023 рік
1	Природний газ, тис. м ³	202,729	145,207	81,984	82,887	81,785
2	Теплова енергія, тис. Гкал	123,846	109,179	136,291	105,369	92,872
3	Електрична енергія, млн кВт·год	27,902	22,765	27,933	20,593	18,331
4	Гаряче водопостачання, тис. м ³	153,766	125,893	142,299	36,375	0,000
5	Холодне водопостачання, тис. м ³	885,280	792,033	693,587	564,618	499,255
6	Водовідведення, тис. м ³	1008,092	878,765	829,800	592,233	486,574

Споживання природного газу

У 2019–2023 роках спостерігалася стійка тенденція до зменшення споживання природного газу (рис. 1). У 2023 р. в порівнянні з 2019 р. споживання природного газу зменшилося на 120,944 тис. м³ (40,34 %). В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 1,102 тис. м³ (1,33 %). Найбільшими споживачами природного газу в м. Запоріжжі (рис. 2) є заклади освіти і науки (61 % від загального споживання), охорони здоров'я (36 %), культури і туризму (3 %).

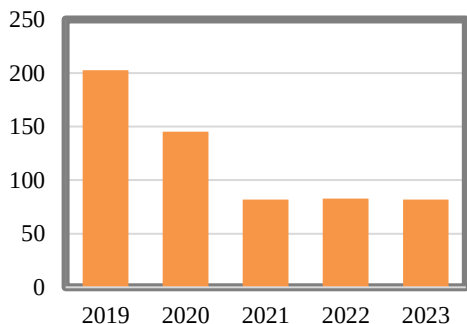


Рисунок 1. - Динаміка споживання природного газу у 2019–2023 рр., тис. м³

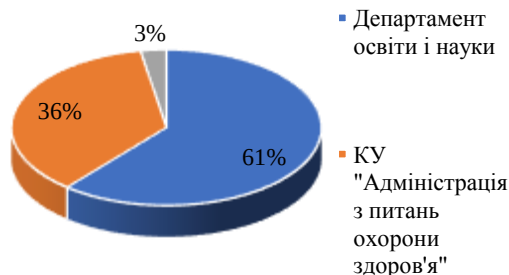


Рисунок 2.- Частка споживання природного газу за 2023 рік, %

Споживання теплової енергії

Зменшення споживання теплової енергії у 2023 році в порівнянні з 2019 роком склало 30,974 тис. Гкал (74,98 %). В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 12,497 тис. Гкал (11,86%), рис. 3.

Восени 2021 року для забезпечення теплопостачання в першу чергу закладів охорони здоров'я рішенням міської ради від 16.04.2021 № 139, [3] було подовжено опалювальний період у м. Запоріжжі з 07.04.2021 до 19.04.2021, що спричинило зростання споживання теплової енергії на 24,8 % до попереднього року. У 2022–2023 роках через введення воєнного стану в Україні більшість міських закладів культури, спорту, освіти тимчасово не працювали або перейшли на дистанційну форму роботи, що призвело до скорочення споживання всіх видів енергоресурсів. Найбільшими споживачами теплової енергії (рис. 4) є заклади освіти і науки (73 %) та заклади охорони здоров'я (19 %).

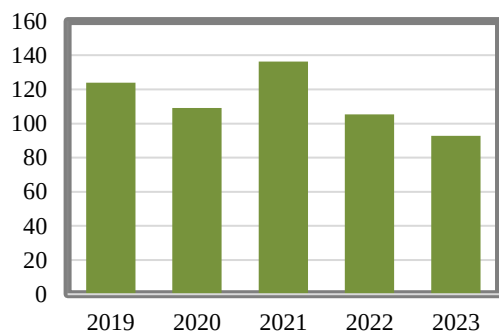


Рисунок 3. - Динаміка споживання теплової енергії у 2019–2023 рр., тис. Гкал



Рисунок 4. - Частка споживання теплової енергії за 2023 рік, %

Споживання електричної енергії

Споживання електричної енергії у 2023 році зменшилося на 9,571 млн. кВт·год (34,3 %) до 2019 року. В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 2,262 млн. кВт·год (11,0 %), рис. 5.

Споживання електричної енергії зменшилося через те, що більшість міських закладів культури, спорту, освіти тимчасово не працювали або перейшли на дистанційну форму роботи після введення воєнного стану в Україні.

Найбільшим споживачем електроенергії (рис. 6) є заклади охорони здоров'я (54 %).

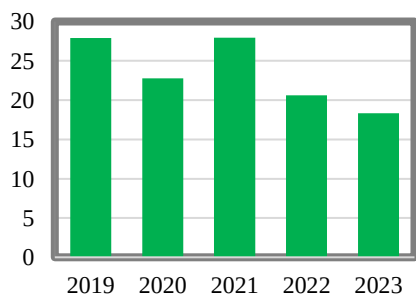


Рисунок 5. - Динаміка споживання електричної енергії у 2019–2023 рр., млн кВт·год

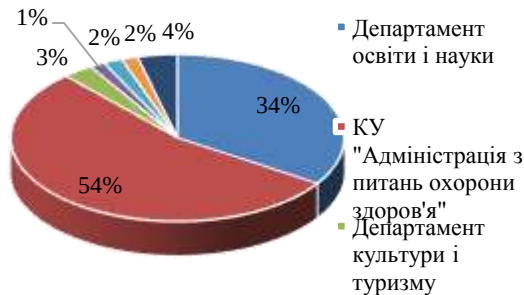


Рисунок 6. - Частка споживання електричної енергії за 2023 рік, %

Споживання гарячої води

Відповідно до рішення міської ради від 27.07.2022 № 43 «Про врегулювання питань надання послуги з постачання гарячої води в місті Запоріжжі» [4] з жовтня 2022 року в місті припинено надання послуги з централізованого постачання гарячої води.

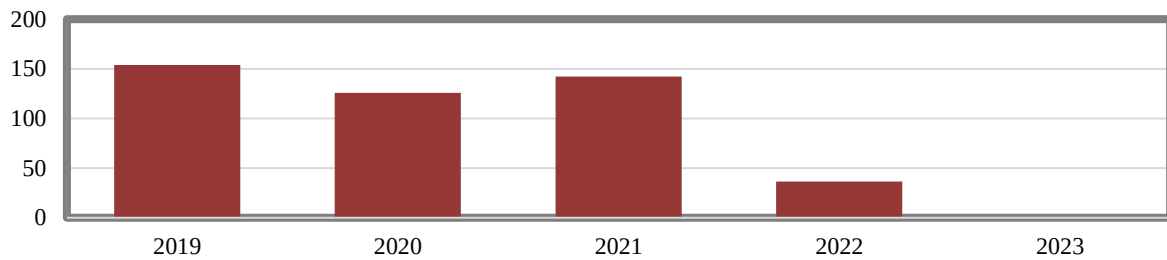


Рисунок 7. - Динаміка споживання гарячої води у 2019–2023 рр., тис. м³

Споживання холодної води

Споживання холодної води у 2023 році зменшилось на 386,025 тис. м³ (43,6%) в порівнянні з 2019 роком. В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 65,363 тис. м³ (11,6 %), рис. 8. Основними споживачами холодної води є заклади охорони здоров'я (61%) та заклади освіти і науки (33 %), рис. 9.

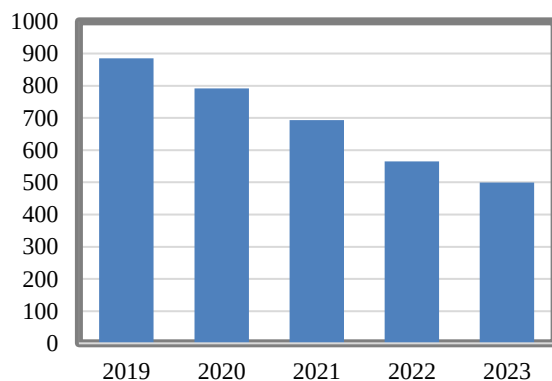


Рисунок 8. - Динаміка споживання холодної води у 2019–2023 рр., тис. м³



Рисунок 9. - Частка споживання холодної води за 2023 рік, %

Визначення пріоритетних секторів енергетичного планування методом розбиття їх за рівнями енергоспоживання

У 2019 році найбільше споживання природного газу припадає на сектор закладів охорони здоров'я, що складає 132,961 тис. м³, що складає 66 % від загального споживання. Споживання в медичних установах зумовлено високим рівнем енергоспоживання, оскільки вони потребують значних обсягів енергії для забезпечення функціонування лікарень, клінік та інших медичних закладів, а також для підтримки систем опалення та гарячого водопостачання. У 2020 році найбільшим споживачем природного газу залишається сектор охорони здоров'я, проте обсяг споживання зменшився до 84,199 тис. м³, що складає 58,0 % від загального споживання. Зменшення споживання може бути пов'язане із зниженням навантаження на медичні заклади в результаті адаптації до умов пандемії COVID-19, а також впровадженням більш ефективних технологій енергозбереження. У 2021 році значним споживачем природного газу стає сектор освіти і науки, зокрема заклади вищої освіти, що використовують газ для опалення аудиторій, лабораторій та гуртожитків. Обсяг споживання в секторі освіти і науки складає 53,290 тис. м³, що становить 65,0 % від загального споживання. У 2022 році найбільшим споживачем є заклади освіти, що становлять 54,123 тис. м³, що складає 65 % від загального споживання. Це може бути пов'язано з відновленням звичайного навчального процесу, що передбачає більші потреби в енергії для опалення та освітлення навчальних приміщень, а також для інших енергетичних потреб навчальних закладів.

Аналіз демонструє зміни у структурі споживання природного газу в різних секторах економіки, що можуть бути обумовлені не лише змінами в чисельності користувачів, а й впровадженням енергозберігаючих технологій та зовнішніми факторами, такими як пандемія та сезонні коливання.

У 2019 році найбільше споживання теплової енергії припадає на сектор освіти і науки, з обсягом 88,343 тис. Гкал, що складає 73 % від загального споживання. Споживання тепла в цьому секторі обумовлено потребою в опаленні великих площ навчальних закладів, лабораторій та гуртожитків. У 2020

році сектор освіти і науки зберігає лідерство за обсягами споживання теплової енергії, хоча його обсяг зменшується до 76,725 тис. Гкал, що складає 72 % від загального споживання. Це скорочення може бути пов'язане з тим, що частина навчальних закладів працює в обмеженому режимі або зменшила своє енергоспоживання через оптимізацію енергетичних процесів. У 2021 році сектор освіти і науки знову демонструє високі показники споживання теплової енергії, збільшившись до 94,755 тис. Гкал, що складає 71 % від загального споживання. Збільшення споживання відбулося через повернення до звичайного формату навчання, що потребує значних енергетичних ресурсів для забезпечення комфорту в класах та інших приміщеннях. У 2022 році сектор освіти залишається лідером серед споживачів теплової енергії з обсягом 73,648 тис. Гкал, що складає 70 % від загального споживання. Змінення споживання в порівнянні з попереднім роком може бути наслідком впровадження більш ефективних технологій для зниження витрат теплової енергії.

Даний аналіз показує, як споживання теплової енергії в секторі освіти і науки змінюється в залежності від внутрішніх змін у навчальних закладах, впровадження енергозберігаючих технологій та сезонних коливань.



Рисунок 10. - Гістограми пріоритетних секторів споживання природного газу у 2019–2022 рр.

Найбільшим споживачем у 2019–2021 роках електроенергії є заклади освіти і науки, оскільки вони потребують значних енергетичних ресурсів для освітніх процесів, освітлення, опалення, вентиляції, а також для роботи комп'ютерної техніки та лабораторного обладнання. Заклади освіти та науки використовують великі обсяги електроенергії для підтримки комфортних умов навчання і досліджень.

З 2022 року найбільшим споживачем електроенергії стають заклади охорони здоров'я. Вони мають постійну потребу в енергії для роботи медичних апаратів, освітлення лікарняних приміщень, системи вентиляції, а також для охолодження та опалення в різних відділеннях. Високе споживання електроенергії в цьому секторі обумовлено необхідністю забезпечити безперебійне функціонування критичної інфраструктури та високі стандарти обслуговування пацієнтів.

Споживання електроенергії за останні роки показує, що заклади освіти і науки були найбільшими споживачами до 2021 року. Високий рівень енергоспоживання в цьому секторі обумовлений інтенсивною

діяльністю, пов'язаною з навчальним процесом та дослідженнями. З 2022 року основним споживачем електроенергії стали заклади охорони здоров'я, що відображає зростаючі потреби в енергії для забезпечення безперебійної роботи медичних установ, де постійно використовується велика кількість технічного обладнання, а також підтримується необхідний температурний режим для комфорту пацієнтів. Тенденція до збільшення споживання енергоресурсів у галузі охорони здоров'я вказує на важливість впровадження енергоефективних технологій для зменшення витрат і забезпечення сталого розвитку.

Найбільшими споживачами гарячої води з 2019 по 2021 рік були заклади освіти і науки, що обумовлено необхідністю постійного забезпечення гарячою водою для навчальних закладів, лабораторій, гуртожитків і інших приміщень, де велику частину часу проводять студенти, викладачі та персонал. Заклади освіти і науки використовують значні обсяги гарячої води для забезпечення комфортних умов перебування в приміщеннях, а також для здійснення процесів, пов'язаних з науковими дослідженнями та лабораторними роботами. З 2022 року найбільшими споживачами гарячої води стали заклади охорони здоров'я. Необхідність постійного забезпечення гарячою водою для лікарняних палат, медичних процедур, санітарії та підтримки належного рівня гігієни у медичних закладах сприяє високому рівню споживання гарячої води. Високе споживання гарячої води в цьому секторі зумовлено критично важливими потребами в забезпеченні комфортних умов для пацієнтів і медичного персоналу. У 2023 році постачання гарячої води було припинено по всіх секторах міста Запоріжжя відповідно до рішення міської ради [4]. Рішення стало наслідком змін у енергетичній політиці та оптимізації витрат, що стосуються енергетичних ресурсів, в умовах змін економічної ситуації та енергетичної кризи.

Споживання гарячої води в міському господарстві показує зміну основних споживачів у залежності від років. До 2021 року переважно споживали заклади освіти і науки, тоді як з 2022 року основне споживання припало на заклади охорони здоров'я, що вимагають великих обсягів гарячої води для медичних і санітарних потреб. Однак, у 2023 році було прийнято рішення про припинення постачання гарячої води на всіх секторах, що стало необхідним кроком для зменшення енергоспоживання і оптимізації ресурсів.



Рисунок 11.- Гістограми пріоритетних секторів споживання теплової енергії у 2019 – 2022 рр.

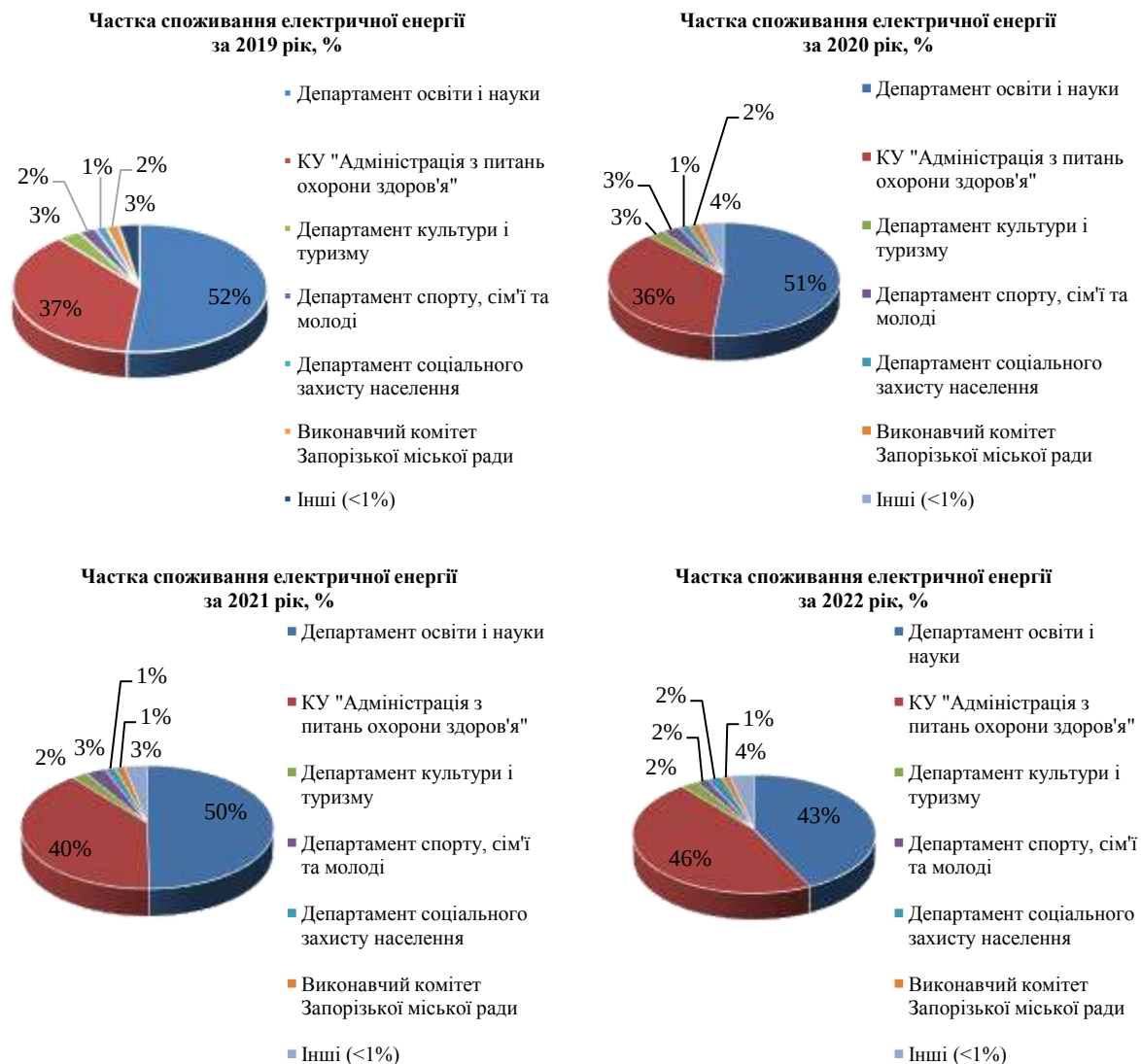


Рисунок 12. - Гістограми пріоритетних секторів споживання електроенергії у 2019–2022 рр.

Найбільшими споживачами холодної води з 2019 по 2021 рік були заклади освіти і науки. Потреби в холодній воді обумовлені великим обсягом навчальних і наукових процесів, а також високими вимогами до забезпечення комфортних умов для студентів, викладачів та персоналу. Заклади освіти та науки споживають велику кількість холодної води для питних потреб, санітарії, технічних цілей та інших процесів, що супроводжують навчальний і науковий процес. З 2022 року найбільшим споживачем холодної води стали заклади охорони здоров'я. Це пов'язано з постійною необхідністю води для медичних процедур, санітарії, а також для підтримки належних гігієнічних умов у лікарняних палатах, клініках та інших медичних закладах. Значне споживання холодної води в цьому секторі зумовлене потребами в очищенні та обробці, а також забезпеченні безпеки пацієнтів і медичного персоналу.

Слід звернути увагу, що до 2021 року найбільшими споживачами холодної води були заклади освіти і науки, а з 2022 року найбільшими споживачами холодної води стали заклади охорони здоров'я. Зростання споживання холодної води в медичних установах зумовлене необхідністю забезпечення великої кількості води для медичних процедур, санітарії та підтримки належних умов для пацієнтів.

Найбільшими споживачами послуг водовідведення з 2019 по 2021 рік були заклади освіти і науки. Велике споживання води в цих закладах спричиняло відповідно необхідність у значних обсягах водовідведення. Потреби у водовідведенні в освітніх установах обумовлені численними навчальними приміщеннями, гуртожитками, лабораторіями та санітарними зонами, де постійно використовуються водні ресурси і потребують ефективного відведення стічних вод.

З 2022 року найбільшими споживачами послуг водовідведення стали заклади охорони здоров'я. Зростання споживання водовідведення в медичних установах зумовлене постійною потребою у воді для

медичних процедур, санітарії, а також великою кількістю людей, що перебувають у лікарнях – пацієнтів і медичного персоналу. Підвищене використання води для забезпечення комфортних і безпечних умов потребує відповідного відведення стічних вод.

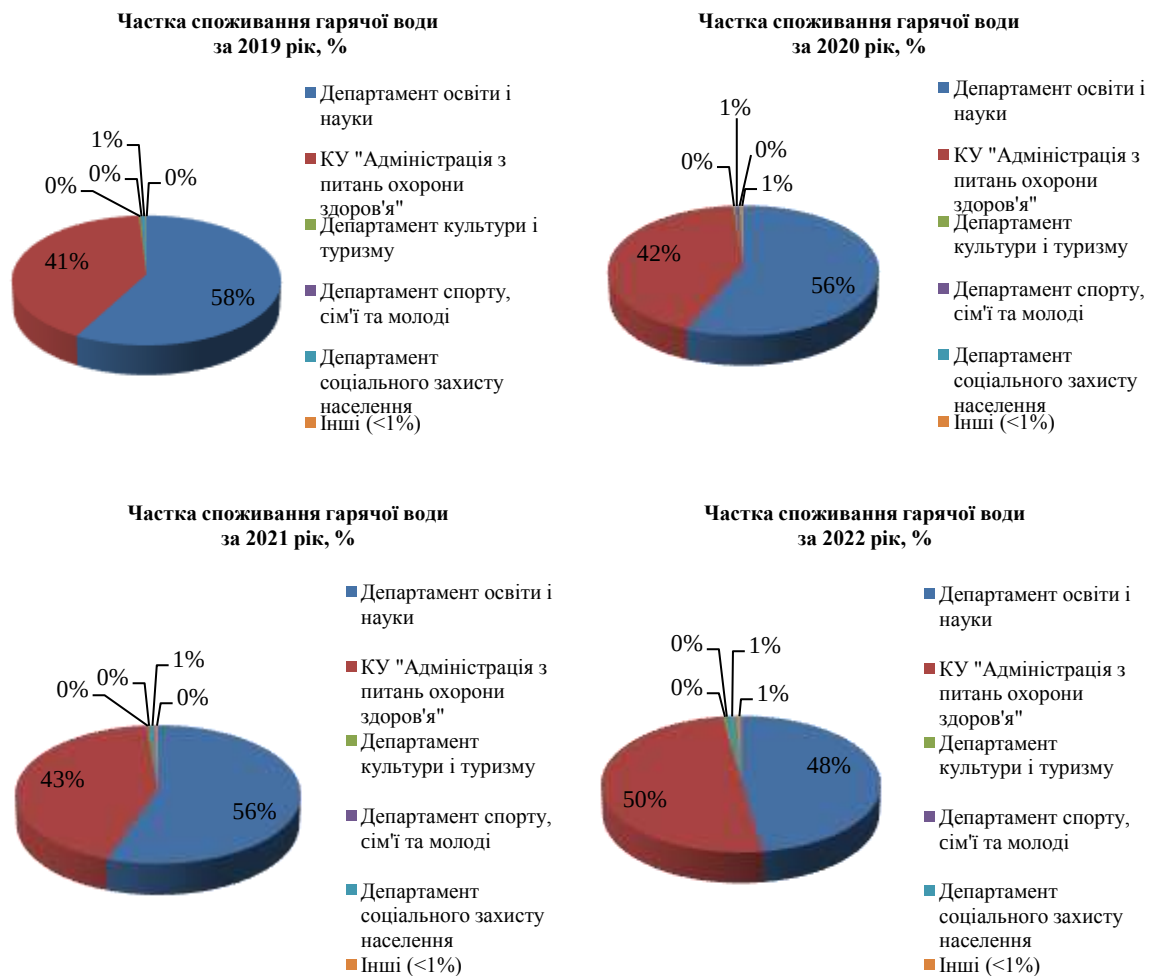


Рисунок 13. - Гістограми пріоритетних секторів споживання гарячої води у 2019–2022 рр.

Аналіз споживання енергетичних ресурсів у місті Запоріжжя за період з 2019 по 2023 рік показує суттєві зміни в структурі споживачів енергоресурсів, що залежить від специфіки діяльності різних секторів. До 2021 року найбільшими споживачами природного газу, електроенергії, холодної води та водовідведення були заклади освіти і науки. Високий рівень споживання обумовлений великою кількістю навчальних закладів, студентів, викладачів і технічного персоналу, а також потребами в енергоресурсах для забезпечення наукових досліджень та побутових потреб.

З 2022 року по 2023 рік основними споживачами енергетичних ресурсів стали заклади охорони здоров'я, що зумовлено потребами в забезпеченні медичних установ для надання належної медичної допомоги, проведення медичних процедур та підтримки санітарно-гігієнічних умов. Зокрема, зростання споживання газу, електроенергії, води та водовідведення в медичних установах пов'язане з постійним функціонуванням медичних приладів, лікарняних палат, а також великою кількістю пацієнтів та медичного персоналу.

У 2023 році в результаті рішення міської ради було припинено постачання гарячої води по всіх секторах міста, що стало важливим кроком до оптимізації витрат енергетичних ресурсів в умовах економічної нестабільності. Зміни у споживанні води та енергоресурсів відображають не лише зміни в попиту на ці ресурси, але й необхідність вжиття заходів з енергоефективності та зменшення навантаження на енергетичну систему міста.

У сучасних умовах підвищеної вартості енергоресурсів та постійного навантаження на місцеві бюджети громади по всій Україні все активніше впроваджують інструменти контролю за споживанням енергії. Енергомоніторинг став не просто актуальним, а критично необхідним елементом управління

бюджетною сферою. Саме підхід, який дозволяє у режимі реального часу відстежувати обсяги споживання електроенергії, тепла, газу та води в закладах комунальної власності, аналізувати ці дані, своєчасно виявляти перевитрати або технічні проблеми та, найголовніше, приймати обґрунтовані управлінські рішення. Яскравим прикладом впровадження енергомоніторингу є місто Запоріжжя.

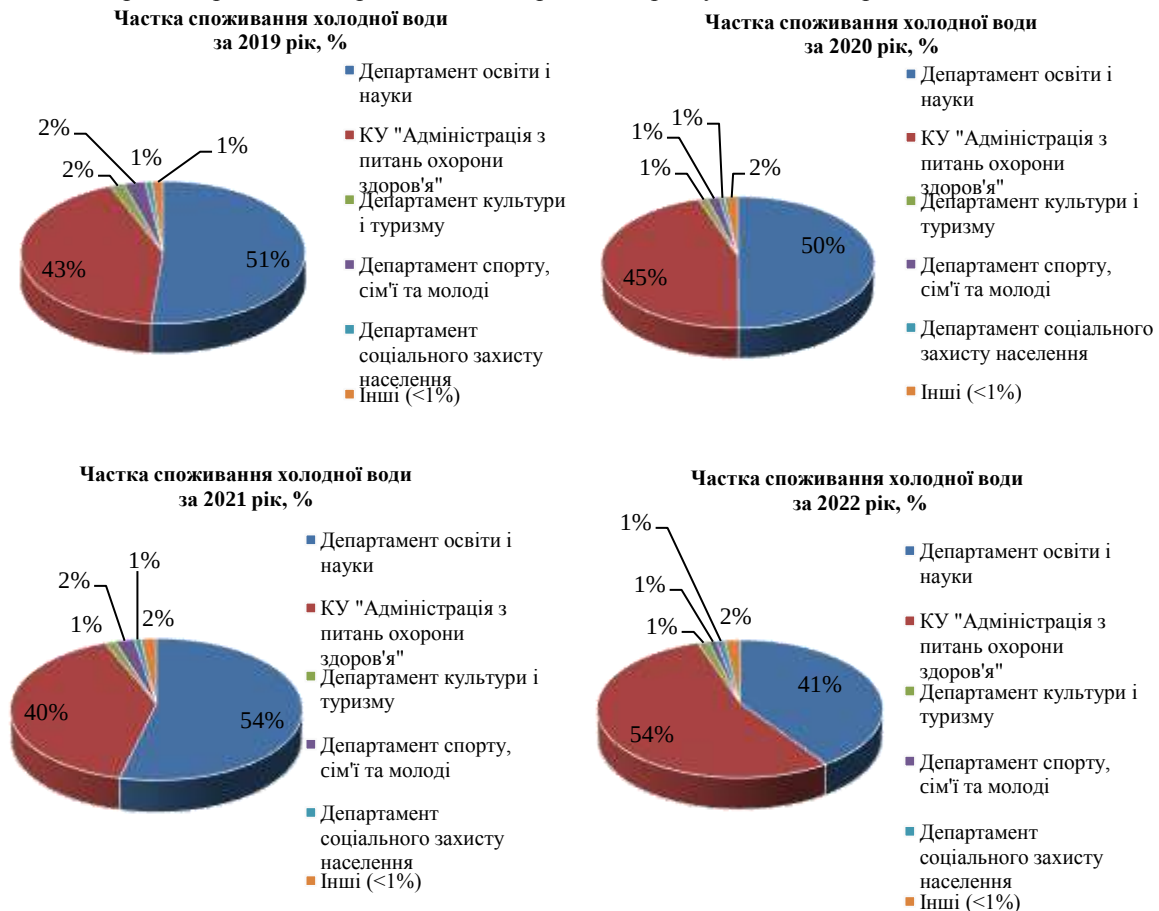


Рисунок 14. - Гістограми пріоритетних секторів споживання холодної води у 2019–2022 рр.

Систему енергомоніторингу в Запоріжжі впроваджено в постійну експлуатацію у 2017 році, але в 2023 році, відповідно до розпорядження міського голови № 12р від 12 січня 2023 року «Про запровадження системи моніторингу споживання енергоресурсів на об'єктах комунальної власності»[5], енергомоніторинг вийшов на новий рівень завдяки створенню сучасної системи, що забезпечує більш ефективний контроль та управління споживанням енергоресурсів на об'єктах комунальної власності. Саме цим документом затверджено Положення, яке регламентує не лише сам механізм енергомоніторингу, а й обов'язки всіх учасників процесу: керівників установ, відповідальних осіб, спеціалістів виконавчих органів міської ради. Запровадження системи стало відповіддю на виклики енергетичної кризи та необхідність економічного і відповідального використання бюджетних коштів.

На практиці енергомоніторинг у місті здійснюється через автоматизовану інформаційну систему (AIC), до якої щодня вносяться показники приладів обліку з кожного об'єкта комунальної власності. А саме, стосується дитячих садків, шкіл, лікарень, адміністративних будівель, будинків культури та інших установ. У кожному закладі призначено відповідальну особу, яка щоденно або щотижнево (залежно від обсягів споживання) знімає показники лічильників та вносить їх до системи. Ці дані стають доступними для енергоменеджерів, фахівців департаменту економічного розвитку та інших відповідальних структур, які аналізують динаміку споживання, порівнюють її з нормативами, погодними умовами та попередніми періодами.

Станом на сьогодні у централізованій програмі енергомоніторингу міста зареєстровано 651 лічильник холодної води, 321 теплотлічильник, 916 електролічильників, а також 8 лічильників природного газу. Такий масштаб охоплення дозволяє отримувати детальну аналітичну картину по всіх сферах енергоспоживання та оперативно виявляти проблемні ділянки або об'єкти з аномально високим споживанням.

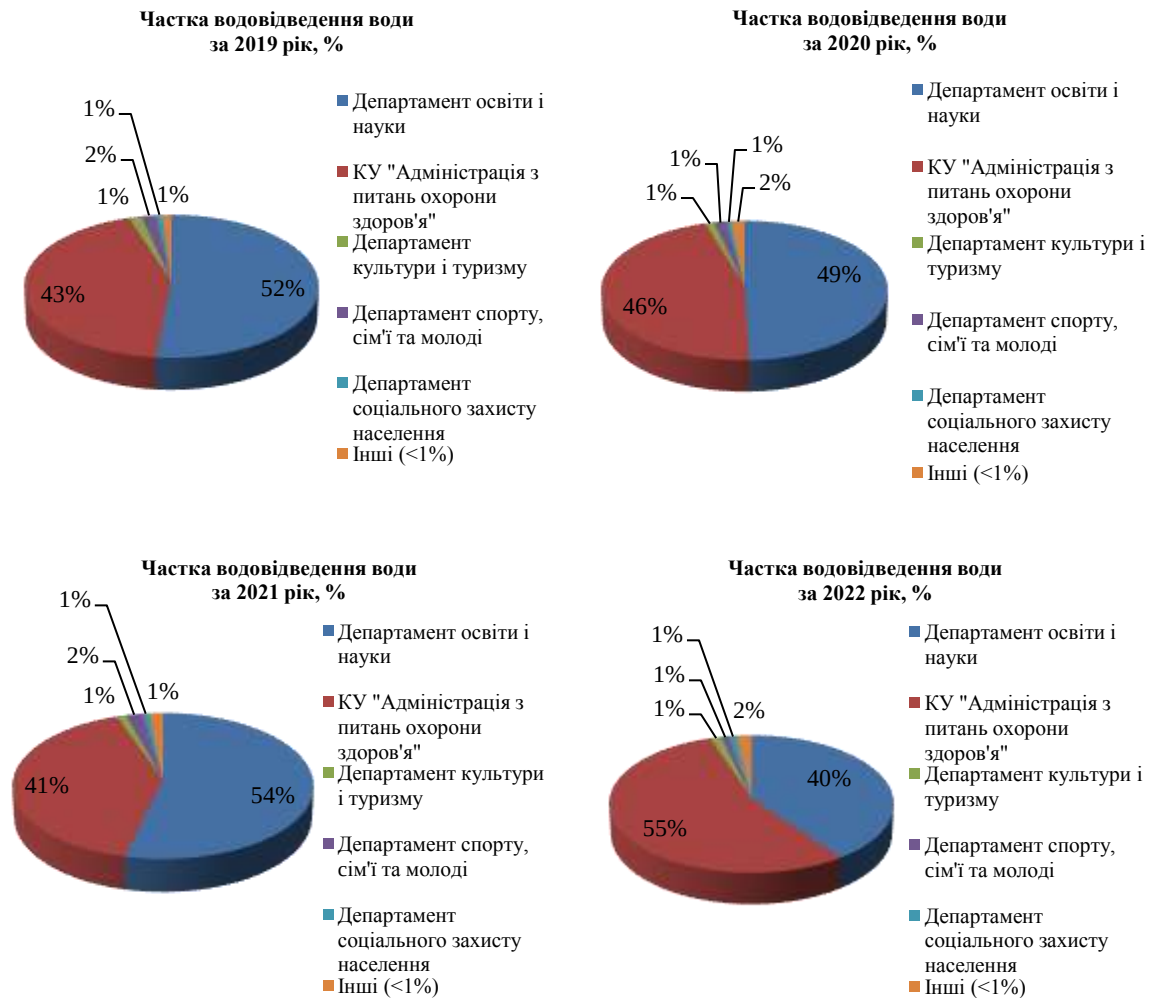


Рисунок 15. - Гістограми пріоритетних секторів водовідведення у 2019–2022 рр.

Особливість запорізької системи полягає ще й у тому, що кожна установа — школа, дитячий садок, медичний заклад чи культурна установа — є окремою юридичною особою яка самостійно ухвалює рішення щодо вибору та встановлення приладів обліку енергоресурсів. Саме тому технічне оснащення різних об'єктів може значно відрізнятися. Проте всі лічильники — незалежно від типу, моделі чи виробника — мають бути зареєстровані та підключені до єдиної системи енергомоніторингу міста.

Найпоширенішими моделями теплолічильників на об'єктах є Sharky 775, які забезпечують точне вимірювання теплової енергії, особливо в умовах нестабільного тиску або перепадів температур. Для обліку електроенергії активно використовуються NIK 2303 та NIK 2301 — надійні та перевірені лічильники, які відповідають вимогам точності й зручності передачі даних. Щодо водопостачання, то для поливу територій часто застосовуються лічильники типу ЛК-15, а для внутрішнього споживання — моделі різного типу, залежно від технічних характеристик конкретної будівлі. У кожного закладу — свої моделі, що зумовлено не лише технічними, а й організаційними особливостями.

Особливу роль відіграє аналітична функція енергомоніторингу. Наприклад, якщо показники свідчать про різке зростання споживання теплової енергії в якомусь закладі, це може сигналізувати про технічну несправність або нераціональне використання ресурсів. У таких випадках відповідальний фахівець може зв'язатися з керівником установи для з'ясування причин та надання рекомендацій. Якщо ж проблема системна — об'єкт вносять до списку пріоритетних на термомодернізацію або капітальний ремонт.

Запроваджена система передбачає не лише збір даних, а й чітке організаційне супроводження процесу. Усі керівники установ мають визначити відповідальних осіб за моніторинг, внести відповідні положення до посадових інструкцій, а самі відповідальні — забезпечити щоденне (чи визначене) оновлення інформації в базі даних. Департамент економічного розвитку надає консультативну підтримку щодо користування АІС, інтерпретації даних та усунення помилок у звітності.

Системний енергомоніторинг у місті дозволяє досягти кількох стратегічних цілей: зменшення бюджетних витрат, виявлення неефективних об'єктів, формування пріоритетів для термомодернізації, прозоре управління ресурсами, а також підготовку достовірних аналітичних звітів для залучення інвестицій та участі в національних чи міжнародних програмах енергоефективності.

Окрім технічної та фінансової ефективності, енергомоніторинг має й виховну складову. Керівники закладів і персонал почали уважніше ставитися до енергоощадності: вчасно вимикати світло, уникати тепловтрат, контролювати витрати води. Таким чином формується нова культура споживання ресурсів — відповідальна, ошадлива та прогресивна.

У підсумку можна сказати, що Запоріжжя впроваджує одну з найсучасніших і найпрозоріших моделей енергомоніторингу серед українських громад. Це приклад, який свідчить про те, що цифрові інструменти, чітка організація та відповідальне ставлення до ресурсів можуть значно підвищити ефективність управління комунальними закладами. У майбутньому місто планує розширити функціональність системи, автоматизувати зчитування даних з приладів обліку та інтегрувати енергомоніторинг у загальну систему управління майном громади. Такий підхід не лише сприяє енергонезалежності, а й зміцнює фінансову стабільність громади в цілому.

Для того щоб Запоріжжя успішно перейшло на повністю автоматизований енергомоніторинг, необхідно здійснити кілька ключових кроків, спрямованих на оновлення технічного обладнання, інтеграцію нових технологій та вдосконалення організаційної структури управління енергоспоживанням.

Висновки:

Визначення стратегічних напрямів енергетичного планування на муніципальному рівні є основою ефективного управління ресурсами та сталого розвитку громад. Формування пріоритетів на основі енергомоніторингу дозволяє не лише раціоналізувати використання енергоресурсів, а й мінімізувати негативний вплив на довкілля. Зокрема, акцент на модернізацію інфраструктури, транспорту, освітлення та поводження з відходами дає змогу досягти суттєвої економії та підвищення якості життя.

Досвід Запоріжжя демонструє, що системний підхід до енергоменеджменту в бюджетній сфері може дати швидкі та вимірювані результати. Завдяки запровадженню автоматизованої системи енергомоніторингу, місто отримало потужний інструмент для аналізу, контролю та своєчасного реагування на перевитрати або технічні несправності. Це дозволяє ефективно планувати термомодернізацію, знижувати навантаження на міський бюджет та покращувати управління закладами комунальної власності.

Реалізація такої моделі управління сприяє формуванню відповідального ставлення до ресурсів серед керівників, персоналу та всієї громади. Енергомоніторинг стає не лише технічним чи фінансовим інструментом, а й важливим елементом нової культури споживання — раціональної, ошадливої та свідомої. Завдяки підтримці Держенергоефективності та застосуванню сучасних методик, громади отримують реальні можливості для участі у програмах сталого розвитку та енергоефективності.

Подальший розвиток системи передбачає повну автоматизацію збору даних, інтеграцію з цифровими сервісами управління майном громади та розширення аналітичних можливостей, що дозволить міським органам влади приймати ще точніші рішення, підвищити прозорість процесів і забезпечити довгострокову енергетичну стійкість. Запоріжжя вже сьогодні демонструє приклад успішного впровадження інновацій, які можуть стати зразком для інших українських міст на шляху до енергонезалежності та економічної стабільності.

Список використаної літератури

1. Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 21 грудня 2024 року № 1163 «Про затвердження Методики розроблення місцевих енергетичних планів» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text> (дата звернення 10.01.2025).
2. Програмний продукт енергомоніторингу UMUNI URL: <https://www.umuni.com/> (дата звернення 15.01.2025).
3. Рішення міської ради від 16.04.2021 № 139 «Про закінчення опалювального періоду 2020-2021 років у місті Запоріжжя», URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/45579> (дата звернення 13.02.2025).
4. Рішення міської ради від 27.07.2022 № 43 «Про врегулювання питань надання послуги з постачання гарячої води в місті Запоріжжі», URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50501> (дата звернення 14.02.2025).
5. Рішення міської ради від 12.01.2023 № 12р «Про запровадження системи моніторингу споживання енергоресурсів на об'єктах комунальної власності у місті Запоріжжя», URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50418> (дата звернення 25.04.2025).

A. Karpenko¹, PhD student, ORCID 0009-0004-5787-4750

B. Rozsokha², ORCID 0009-0004-1560-0401

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

²Zaporizhzhia City Council

PRIORITY SECTORS OF ENERGY PLANNING IN MUNICIPALITIES

The article examines the current problems of energy planning in municipalities of Ukraine. Attention is focused on the importance of energy, monitoring and control over the use of energy resources to ensure sustainable development and environmental safety. The methodology for developing local energy plans approved by the Ministry of Community, Territory and Infrastructure Development of Ukraine, as well as support and monitoring of the implementation of such plans by the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, is analyzed. The practical aspect of the study is based on the analysis of energy consumption of municipal facilities in the city of Zaporizhzhia, which allows assessing the effectiveness of the implemented energy efficiency measures and their impact on reducing energy consumption. Bibliography 4, Fig. 9, Table 1.

Keywords: energy efficiency, energy management, energy monitoring, energy consumption, energy planning, municipality, sustainable development.

References

1. Order of the Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine dated December 21, 2024 No. 1163 “On Approval of the Methodology for Developing Local Energy Plans” URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text> (access date 01/10/2025).
2. UMUNI energy monitoring software product URL: [URL:https://www.umuni.com/](https://www.umuni.com/) (access date 01/15/2025).
3. Resolution of the City Council dated April 16, 2021 No. 139 “On the End of the 2020-2021 Heating Period in the City of Zaporizhzhia”, URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/45579> (access date 02/13/2025).
4. Decision of the City Council dated 07/27/2022 No. 43 “On the settlement of issues of providing hot water supply services in the city of Zaporizhzhia”, URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50501> (date of application 02/14/2025).
5. Decision of the City Council dated January 12, 2023 No. 12p “On the introduction of a system for monitoring energy consumption at municipal property facilities in the city of Zaporizhzhia”, URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50418> (access date 04/15/2025).

Надійшла: 19.06.2025

Received: 19.06.2025

КЛАСИФІКАЦІЯ СПОЖИВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ: АДАПТАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ ПРАКТИК ДЛЯ УКРАЇНИ

У статті проведено систематизований огляд основних підходів до класифікації споживачів енергії, що застосовуються у світовій практиці для підвищення ефективності управління енергосистемами. Розглянуто класифікацію за секторами, за режимом навантаження із можливістю управління попитом, що в дослідженнях NREL підвищує ефективність програм до 15–20 %, та за рівнем енергоефективності (Energy Star, ISO 50001), які забезпечують 10–20 % економії вже в перші роки застосування. Окремо проаналізовано маркетингові методи сегментації, що підвищують залучення учасників на 25–30 %, та практичні кейси США із тарифами й схемами реагування на попит, які скорочують пікове навантаження на 5–10 %. В українському контексті обмежують детальну сегментацію ≈ 20 % проникнення смарт-лічильників та нерівномірна галузева структура. Тому запропоновано спрощену трирівневу класифікацію із можливістю подальшого розширення до п'яти категорій для тонкого таргетування тарифів, аудиту та програм підтримки. Отримані результати можуть бути використані для розробки національних політик енергоефективності, сценарного моделювання навантажень, формування диференційованих тарифів, ініціатив управління попитом і муніципальних стратегій розвитку. Запропонована інтеграція секторної, часової та класифікації на основі енергоефективності створює платформу для реалізації принципу «енергоефективності на першому місці» в Україні.

Ключові слова: класифікація споживачів, енергоефективність, управління попитом, енергетична політика, енергоспоживання.

1. Вступ

Сучасна енергетика стикається з викликами, що зумовлені зростанням попиту на енергоресурси, необхідністю декарбонізації, нестабільністю енергопостачання та потребою підвищення ефективності використання наявних ресурсів. В умовах обмежених інвестицій і високої енергоємності національної економіки особливої актуальності набуває впровадження інструментів, здатних забезпечити цілеспрямоване управління енергоспоживанням. Одним із таких інструментів є класифікація споживачів енергії за різними критеріями, яка дозволяє диференціювати підходи до стимулювання енергоефективності, розробки тарифних стратегій, впровадження технологій керування попитом та планування інфраструктурних змін.

У світовій практиці класифікація споживачів вже давно використовується як аналітична та управлінська основа для енергетичної політики, проте в Україні цей підхід досі не має системного застосування. Існуюча система обліку енергоспоживання здебільшого обмежується агрегованими показниками за секторами, без урахування особливостей режимів навантаження, гнучкості чи рівня енергоефективності окремих категорій споживачів. Це ускладнює впровадження адресних заходів, ефективний розподіл ресурсів, а також модернізацію місцевих енергетичних систем відповідно до принципів сталого розвитку.

Таким чином, проблема полягає в відсутності адаптованої до національного контексту системи класифікації споживачів енергії, яка б могла стати основою для формування ефективної політики енергоспоживання на державному, регіональному та муніципальному рівнях.

Проблематика класифікації споживачів енергії розглядається у контексті енергоефективності, управління попитом, інтеграції відновлюваних джерел та децентралізації енергосистем у численних зарубіжних дослідженнях [1–9]. У документах Міжнародного енергетичного агентства (IEA) [10, 11], Європейської комісії (ЄК) [12, 13], Світового банку [14] та інших міжнародних організацій класифікація споживачів використовується для формування сценаріїв енергетичного планування, оцінки потенціалу участі у програмах керування попитом (ПКП) та розвитку гнучкості енергоспоживання.

Остання хвиля аналітичних звітів ілюструє, як багаторівнева сегментація переходить із теоретичної площини у практичні інструменти політики. Так, IEA «Energy Efficiency 2024» [10] показує, що таргетовані заходи для чотирьох кластерів кінцевого попиту (будівлі, прилади, транспорт, промисловість) можуть забезпечити понад 70% скорочення пікового попиту на нафту та 50% – на газ до 2030 р. Дослідження METIS-3 S7 [12] Єврокомісії, перейшовши від національного до регіонального (NUTS1) рівня моделювання, доводить: деталізація навантажень за типами споживачів і регіонами дає змогу зменшити системні витрати та потребу в резервних теплових потужностях до 5%. Звіт «Framing Summer Energy Poverty» [13] виокремлює кластер «літньої вразливості» домогосподарств без ефективного охолодження і

пропонує спеціальні тарифні та поведінкові ПКП для зсуву кондиціонерних піків. Керівництво Світового банку щодо ПКП пропонує матрицю вибору тарифів (TOU, CPP, PTR) залежно від цифрової зрілості споживача, де для малозабезпечених домогосподарств рекомендовано схему PTR, а для промислових кластерів – контракти Interruptible/DSB [14]. Отже, міжнародна практика підтверджує: детальна соціальна, регіональна та поведінкова класифікація споживачів є необхідною передумовою точного сценарного планування та ефективних ПКП.

На відміну від макрорівневих звітів, у науковій літературі основна увага приділяється алгоритмічній диференціації споживачів за добовими профілями, участю в ПКП та енергетичною поведінкою. Так, у [15] профілі майже 30 тис. домогосподарств класифіковано на категорії A-D за величиною пікових навантажень; застосована сегментація дала змогу знизити сукупний добовий дефіцит потужності до 0,73%, істотно підвищивши ефективність інтелектуального управління навантаженням. У [16] оброблено масив 30-хвилинних даних смарт-лічильників; поєднання алгоритмів k-means++ та DTW сформувало п'ять стійких кластерів, а таргетовані динамічні тарифи зменшили вечірній пік майже на 10%. Дослідження [17] демонструє ML-фреймворк для 4,4 тис. лондонських домогосподарств: сім кластерів із виключенням $\approx 10\%$ нестабільних профілів забезпечили найменшу середню похибку прогнозу та найвищу віддачу DR-заходів.

Окремо варто згадати сегментацію комерційних і промислових споживачів. Для комерційного сектору у [18] проаналізовано трирічні дані майже 2000 споживачів: функціональний аналіз даних у поєднанні з багаторівневою кластеризацією (Gaussian mixture + clustering tree) виокремив ключові шаблони навантаження, що формують основу для гнучких стратегій управління попитом і скорочення енергетичних витрат. У транспортному секторі дослідження [19] класифікує зарядні сесії електробусів за часовими вікнами та рівнем SOC, що дає можливість оптимізувати нічні й денні піки зарядження й інтегрувати їх у локальні ПКП.

Нарешті, робота [6] акцентує на тому, що для повноцінного розгортання смарт-мереж потрібна класифікація споживачів із урахуванням рівня їх цифрової інтегрованості, готовності до смарт-контрактів і блокчейн-транзакцій. Автори показують, що лише динамічний поділ на групи «про-споживачів», користувачів електромобілів та високо-автоматизованих побутових споживачів робить ПКП економічно доцільними.

Національні політики дедалі ширше застосовують деталізовані типології. Звіти щодо імплементації Директиви 2012/27/ЄС [20] зазначають, що поділ споживачів за секторами й розміром дає змогу точніше розраховувати квоти енергозбереження та визначати адресні стимули (податкові, інформаційні, технічні). Ініціативи ENEFIRST [21] та eesee [22] прямо вказують: сегментація споживачів є ключовим елементом принципу «енергоефективності на першому місці».

В українських умовах класифікаційні підходи поки що застосовуються фрагментарно. Доступні праці здебільшого описують сукупне споживання за секторами економіки [23, 24], оцінюють енергоефективність підприємств [25, 26] чи розробляють муніципальні плани енергоефективних заходів [27–29]. Системна типологія, що інтегрує технічні й поведінкові характеристики й слугує основою для ПКП, наразі відсутня.

Попри наявність окремих пілотних проектів, українська нормативна та цифрова база поки відстає від світових практик. Стандарт EN 17267:2019 [30] регламентує енергомоніторинг на рівні ЄС, тоді як національні вимоги до АСКОВЕ затверджено лише наказом Держенергоефективності України від 14 листопада 2023 р. № 375/2023, а програма «100 тис. смарт-лічильників» Міненерго перебуває на початковій стадії. Пілотний проект «SmartGrid: Україна на шляху до енергореволюції» (2025) охоплює всього 3600 лічильників, тобто $<1\%$ від необхідного масштабу. У НЕКП-2030 [31] сегментацію споживачів поки згадано лише як «майбутній крок».

Таким чином, міжнародні дослідження переконливо доводять, що детальна класифікація кінцевих споживачів підвищує точність прогнозування, полегшує таргетування динамічних тарифів і мінімізує системні витрати. Водночас в Україні спостерігається розрив між глобальними практиками й поточним станом методологічної бази, що підкреслює необхідність адаптації й упровадження класифікаційних підходів, релевантних національним технічним і соціально-економічним умовам.

Метою даного дослідження є провести систематизований огляд міжнародних підходів до класифікації споживачів енергії, оцінити їхню практичну придатність з огляду на технічні, економічні та поведінкові особливості українського енергоринку, а також сформулювати рекомендації щодо адаптації та впровадження цих класифікацій у національну енергетичну політику та програми енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети застосовано якісний оглядовий підхід. На першому етапі було сформовано масив міжнародних джерел – аналітичних звітів IEA, ЄС, Світового банку та профільних дослідницьких ініціатив, що безпосередньо містять класифікаційні схеми споживачів енергії або використовують сегментацію як інструмент політики. На другому етапі відібрано наукові публікації, у яких реалізовано алгоритмічну сегментацію на основі смарт-даних, а також роботи, присвячені інтенсивним індикаторам і секторальним класифікаціям. Українські нормативні та статистичні матеріали

залучалися на третьому етапі з метою зіставлення міжнародних підходів із наявною практикою та виявлення регуляторних і цифрових обмежень їхнього впровадження.

2. Класифікація споживачів за обсягом річного споживання

2.1. Нормативні порогови

У сучасній енергетичній політиці жорстко фіксовані мінімальні межі річного споживання виконують роль «регуляторного решета», через яке держави визначають коло обов'язкових енергоаудитів (ЕА) і вимог до систем енергоменеджменту (EMS ISO 50001). Після перегляду Директиви (EU) 2023/1791 принцип «енергоефективності на першому місці» набув сили закону: компанії, що споживають > 2,75 ГВт·год/рік (10 TJ) – повинні проходити обов'язковий ЕА, а при > 23,6 ГВт·год/рік (85 TJ) – впроваджувати EMS ISO 50001 [32].

Серед практичних реалізацій нормативних порогів можна виокремити кілька типових моделей. В Італії статус «*energivori*» (італ. «енергоємний») надається підприємствам зі споживанням не менше 1 ГВт·год/рік в енергоємних секторах; вони отримують знижені надбавки й податки на електроенергію за умови реалізації принаймні одного заходу з енергоефективності протягом чотирирічного циклу та участі в механізмі «*Energy Release*», що поєднує авансові поставки електроенергії з довгостроковими зобов'язаннями щодо розвитку ВДЕ [33–35]. У Німеччині схема *Besondere Ausgleichsregel* (*BesAR*) дозволяє підприємствам з річним споживанням понад 1 ГВт·год і належністю до визначених енергоємних секторів сплачувати *EEG*-надбавку за зниженою ставкою, яка градуально зменшується до 0,05 цт/кВт·год при обсягах понад 100 ГВт·год, але вимагає впровадження ISO 50001 / EMAS або регулярного енергоаудиту [36–38]. Франція через Закон № 2025-391 (*DDADUE-2025*) імплементує Директиву (EU) 2023/1791: підприємства зі споживанням $\geq 2,75$ ГВт·год мають пройти енергоаудит, а при $\geq 23,6$ ГВт·год – впровадити систему енергоменеджменту ISO 50001 у визначені строки, публікуючи річні плани заходів; це відкриває доступ до грантової підтримки (зокрема PRO-SME_{en}), але супроводжується суттєвими адміністративними вимогами та ризиком штрафів до 2–4 % обороту [39–41].

За межами ЄС застосовуються «мегапороги», орієнтовані на найкрупніших споживачів: у США програма *DOE Save Energy Now* охоплює майданчики з попитом ≥ 1 трлн Btu/рік (≈ 293 ГВт·год) [42], у Китаї *Top-10000* поширюється на підприємства з річним енергоспоживанням понад 10000 тсе (≈ 81 ГВт·год), що забезпечують близько 60 % промислового попиту [43], у Японії Закон про енергозбереження виділяє два типи споживачів за порогоми > 3 000 та > 1 500 кЛ н.е. (≈ 33 і 16 ГВт·год відповідно) [44], тоді як в Індії схема «*Perform Achieve Trade*» задає галузеві порогови для «призначених споживачів», наприклад > 30 000 тсе/рік (≈ 349 ГВт·год) у цементній промисловості [45]. У результаті формується ієрархія від бінарних «енергоємних» порогів до багатоступеневих і «мегаблокових» шкал, які охоплюють менше 2 % найбільших споживачів, але визначають структуру попиту.

Пороги формують три типи шкал:

- Бінарна (низький / високий) — проста, дешеве адміністрування (Італія);
- Багатоступенева — тонке налаштування пільг і зборів (Німеччина, Франція);
- «Мегаблок» — фокус на < 2 % «гігантів» (США, Китай, Індія).

Водночас економіка й технології змінюються швидше, ніж переглядаються жорсткі ліміти, тому все більше країн переходять до гнучких, статистично-орієнтованих підходів.

2.2. Статистично-квантильна сегментація

«Великі», «середні», «дрібні» споживачі визначаються не фіксованим числом, а позицією у вибірці (децилі, квартилі, топ-1%). Метод застосовується, коли регулятор прагне динамічно підлаштовуватися до ринку: наприклад, на базі EU-індикатора «Споживчий слід» різниця між 10-м і 90-м перцентилями по країнах сягає 3,5 раза [46]. Така диспропорція обґрунтовує таргетування податку чи субсидії саме на верхні 10%.

Переваги: гнучкість до макрозмін; недоліки: щорічний перерахунок і складна комунікація бізнесу.

Серед прикладів застосування квантильної сегментації споживачів для цілей енергетичної політики можна виокремити кілька показових кейсів. У Китаї в межах програми *Top-1000 Energy-Consuming Enterprises* Національна комісія з розвитку та реформ (NDRC) відібрала 1000 найбільших енергоспоживачів, на які припадало близько третини промислового попиту на енергію, і встановила для них індивідуальні цільові показники енергоощадності; згодом ініціативу було розширено до *Top-10 000*, що фактично відповідає переходу від найвищого перцентилу до ширшого верхнього квантиля [43, 47]. У Великій Британії регулятор Ofgem періодично сегментує домогосподарства за децилами споживання й поведінковими ознаками, формуючи «архетипи» для моделювання впливу тарифних змін і субсидій на різні групи споживачів, зокрема вразливі домогосподарства [48]. У Швейцарії Федеральне управління енергетики (SFOE) разом із дослідниками ZHAW застосовують децилі та 90-ті перцентилі споживання та вуглецевого сліду домогосподарств, щоб адресно таргетувати програми підтримки енергоефективності й оцінювати соціальну справедливість кліматичних заходів [49]. У Мексиці в рамках підготовки реформ енергетичних тарифів і вуглецевого оподаткування аналітичні моделі *Regulatory Assistance Project* демонструють, як децилі доходу та енергоспоживання використовуються для поступового запровадження

прогресивних ставок і фокусування стимулів на верхніх 10 % споживачів, які генерують непропорційно високий обсяг попиту [50].

У підсумку квантильна сегментація дає змогу або виділити «верхівку» найбільших енергоспоживачів для жорсткіших зобов'язань щодо енергоефективності, або, навпаки, сконцентрувати підтримку на вразливих групах, забезпечуючи поєднання цільової результативності та елементів соціальної справедливості.

2.3. Класифікація, орієнтована на дані

З поширенням смарт-лічильників популярним стає підхід «алгоритм сам виявляє класи»:

- Алгоритм k-means ($k = 3-7$) стійко виділяє групи домогосподарств за середнім і дисперсією добового профілю [51]. Прикладом застосування такого алгоритму є пілот-кейс Фінляндії (SGEM, 2016), який використав ≈ 500 тис. годинних профілів зі смарт-лічильників і кластеризував їх алгоритмом k-means ($k = 5$). Найменший кластер «Heavy Users» охопив лише 12% точок, але формував 28% річного попиту й до 40% зимового піка. Після запровадження для нього динамічного тарифу *Spot-plus* (змінна ціна + надбавка у вечірній пік) споживання в пікові години знизилося на $\approx 4\%$ уже в перший сезон.

- Альтернативи – ієрархічне агломеративне кластерування, SOM-карти, DBSCAN для нерівномірних вибірок [52, 53].

Алгоритм обчислює центроїд-споживання (середню річну кВт·год) для кожного кластера, що дає натуральні порогові «малий/середній/великий». Рекомендації ЄК щодо Article 8 (Commission Recommendation 2024/2002) уже прямо дозволяють застосовувати *clustering & sampling* як альтернативу суцільному аудиту, якщо методика документована [54].

Переваги: порогові виникають із самих даних; легко масштабувати на різні секторні підвибірки, недоліки: результати чутливі до вибору коефіцієнтів та попередньої нормалізації; потреба в великому масиві інформації.

3. Інтенсивні індикатори

У високотехнологічних галузях застосовують нормування на валову додану вартість (ВДВ) або фізичний випуск продукції [55]. За Комунікацією ЄК «Guidelines on State aid for climate, environmental protection and energy 2022» (CEEAG) [56], енергоємні підприємства класифікуються за двома критеріями: енерговитрати понад 3 % валової доданої вартості (ВДВ) або споживання електроенергії понад 2 ГВт·год на кожен мільйон євро ВДВ. Ці порогові застосовуються для оцінки допустимості пільг зі зниження відрахувань із електроенергії.

Переваги: точне таргетування: фокус на реальних споживачах із високою енергоємністю, що дозволяє спрямовувати підтримку туди, де вона справді потрібна; стимулювання інвестицій: обов'язкова прив'язка пільг до енергоменеджменту та інвест-проектів сприяє довгостроковій ефективності.

Недоліки: адміністративні витрати: необхідність підтвердження показників ВДВ та енергоспоживання збільшує навантаження на бізнес і регуляторів; ризик неврахування динаміки: фіксовані порогові можуть вимагати перегляду в умовах швидких змін макроекономіки та цін на енергоносії.

Серед країн, які застосовують інтенсивні індикатори – насамперед енерговитрати на одиницю доданої вартості – для класифікації підприємств, можна виокремити кілька репрезентативних прикладів. В Іспанії порогові $> 3\%$ ВДВ або > 2 ГВт·год/млн € ВДВ використовуються для визначення електроємних секторів, яким компенсують «зелені» надбавки на електроенергію відповідно до CEEAG (2022) § 4.11 [57]. У Німеччині в межах схеми *EEG-Umlage* виділяється, зокрема, категорія «В» для підприємств із витратами на електроенергію понад 17 % ВДВ (знижка до 85 %, але не більше 0,5 % ВДВ) та категорія «С» для тих, у кого ці витрати становлять 14–17 % ВДВ (знижка до 80 %, але також обмежена 0,5 % ВДВ) [58]. У Великій Британії в схемі компенсації непрямих витрат *EU ETS / Carbon Price Support* встановлено вимогу, щоб сума «переданих» вуглецевих витрат досягала щонайменше 5 % ВДВ підприємства [59].

У підсумку інтенсивні індикатори дають змогу не просто виділити великі за обсягом споживачі, а сконцентрувати підтримку й пільгові режими саме на тих компаніях, для яких енергія є структурно критичним елементом собівартості продукції.

4. Секторальна класифікація Міжнародного енергетичного агентства

Міжнародне енергетичне агентство (IEA) застосовує секторальну класифікацію кінцевого споживання енергії для уніфікованого порівняння між країнами. У базі «World Energy Balances» [60] усі види кінцевого попиту поділено на чотири категорії: домогосподарства, комерційні та муніципальні послуги, промисловість та транспорт. Для більш детального аналізу IEA реалізує модель у вигляді матриці 4×4 , де по горизонталі представлені ті самі чотири сектори, а по вертикалі – категорії кінцевого використання: тепlopостачання, пристрої, перевезення та технологічні процеси. Такий підхід дозволяє аналізувати перетини «сектор-фінальне використання» для виявлення найбільш енергоємних вузлів [60]. Джерела даних поєднують як агреговані статистичні баланси, так і детальні профілі споживання: у розвинених країнах активно застосовують 30-хвилинні та годинні дані зі смарт-лічильників разом із

адміністративною інформацією (метраж приміщень, тонна-кілометри транспорту тощо), що дає змогу врахувати часові шаблони споживання на рівні окремих сегментів [61].

Практичним прикладом є пілотний проект динамічного тарифоутворення в м. Копенгаген, реалізований Е.ON у партнерстві з ІЕА: використання *Time-of-Use-тарифів* на основі матриці 4×4 спонукало домогосподарства зменшити піковий попит, а в комерційному секторі спостерігалось зниження пікових навантажень завдяки ціновим сигналам [62].

Основні переваги підходу полягають в уніфікації категорій для крос-національного порівняння, гнучкості аналізу перетинів секторів і кінцевих використань та можливості поєднання матричної класифікації з інструментами управління попитом і динамічними тарифами для оптимізації пікового навантаження. Водночас підхід потребує значних обсягів деталізованих даних і чітких стандартів їхньої обробки; розбіжності у методиках збору інформації про кінцеве енерговикористання між країнами можуть ускладнювати порівняння, а розміри масивів даних вимагають потужної ІТ-інфраструктури для їх аналізу [60].

Загалом, секторальна класифікація ІЕА у форматі 4×4 є потужним інструментом для аналізу структури кінцевого споживання, підтримки політик енергоефективності та впровадження програм управління попитом; її подальший розвиток залежить від удосконалення стандартів збору даних і інтеграції сучасних алгоритмів обробки великих масивів інформації.

5. Класифікація за режимом навантаження

Класифікація за режимом навантаження поділяє споживання електроенергії на три основні режими: базове навантаження, проміжне навантаження і пікове навантаження. Базове навантаження – це мінімальний рівень попиту, який енергосистема має покривати постійно; його визначення відповідає «мінімальна кількість електроенергії, що постачається або потрібна протягом певного періоду часу зі сталою швидкістю» [63]. Проміжне навантаження (слідування за навантаженням) змінюється протягом дня в межах прогнозованих коливань і покривається джерелами, що швидко нарощують чи знижують генерацію [63]. Пікове навантаження – це короточасні сплески попиту, за яких задіюють найшвидші, але найдорожчі «пікові» блоки або накопичувачі енергії.

У тарифних схемах часто виділяють пік/поза піком/плече - періоди: години пікового навантаження (зазвичай будні з 7:00 до 23:00), години мінімального попиту (поза піком) і перехідні інтервали (плече). Змінні ціни стимулюють споживачів переносити споживання у дешевші години, що зменшує пікові навантаження електромережі [64].

Аналітичним інструментом для розподілу за тривалістю є Load Duration Curve (LDC) – крива, що ранжує всі години за величиною навантаження, а не хронологічно, і чітко виділяє базове, проміжне й пікове навантаження за часом.

Для автоматизованого визначення меж режимів використовують кластерний аналіз профілів споживання або LDC: статистичні методи дозволяють адаптивно «вилучати» базовий/проміжний/піковий сегменти, враховуючи сезонні викиди та аномалії.

Серед практичних реалізацій класифікації за режимом навантаження виділяються кілька показових випадків. У Великій Британії в системі розрахунків за електроенергію використовуються класи профілів 5–8 для малих і середніх споживачів, які розрізняють за коефіцієнтом навантаження та піковим фактором; це дає змогу диференціювати тарифи залежно від інтенсивності піків. У США генераційні блоки з коефіцієнтом використання встановленої потужності $\geq 70\%$ вважаються базовими, $< 15\%$ – піковими, а проміжні значення відповідають напівпіковим потужностям, що спрощує оцінку потреби в нових генеруючих потужностях і вибір відповідних тарифів для генерації [65]. У Німеччині стандартні профілі навантаження BDEW класифікують низьковольтних споживачів за 11 профілями (H0 для домогосподарств, G0–G6 для комерційних споживачів, L0–L2 для сільського господарства) з роздільністю 15 хв для розрахунків і тарифікації [66]. В Австралії оператор ринку АЕМО обчислює профіль мережевого системного навантаження (NSLP) для загального споживання та профіль контрольованого навантаження (CLP) для навантажень типу бойлерів, використовуючи дані з накопичувальних і вибіркового лічильників; ці профілі регулярно публікуються для коректного розрахунку тарифів [67, 68]. У рекомендаціях *EU Smart Grid Task Force (Expert Group 3)* подібна логіка поширюється на побутові та малі комерційні точки (≤ 100 кВт) для оцінки потенціалу реагування на попит: активація реагування базується на високочастотних (15–60 хв) даних зі смарт-лічильників, що дозволяє чітко відслідковувати відхилення від нормованого профілю та запускати коригуючі дії.

Отже, класифікація за режимом навантаження виступає універсальним інструментом для планування потужностей, диференційованого тарифоутворення та запуску програм реагування на попит. Водночас, подібно до секторального підходу ІЕА, вона потребує розвиненої ІТ-інфраструктури, стандартизованих процедур збору й верифікації даних, а також алгоритмічних рішень для попередньої обробки великих масивів споживчих профілів.

6. Класифікація за рівнем енергоефективності

Класифікація за рівнем енергоефективності базується на бінарних ознаках, що вказують на наявність формалізованої сертифікації або системи енергоменеджменту: або «впроваджено», або «не впроваджено». Така простота дозволяє швидко розгорнути політики підтримки й дає зрозумілий сигнал ринку, але ігнорує часові та поведінкові аспекти споживання [69].

Energy Star – це програма Американського Агентства з охорони довкілля (EPA), яка класифікує обладнання та будівлі як «сертифіковані» (Energy Star Certified) або «не сертифіковані». Сертифікація базується на суворих енергетичних вимогах до продукції та об'єктів, що дає міжгалузевий стандарт для «зеленого» фінансування й споживацького вибору [70].

Дослідження EPA показують, що автомобільні заводи в США, які беруть участь у *Energy Star*-бенчмаркуванні, знизили споживання палива на 12% за п'ять років порівняно з несертифікованими підприємствами [71]. Окрім того, сертифіковані комерційні будівлі демонструють на 34% нижчий ризик дефолту по іпотеці, що робить *Energy Star* важливим інструментом для фінансових установ [72].

ISO 50001 встановлює бінарну ознаку «EnMS implemented / not implemented», тобто чи впроваджена в організації система енергоменеджменту. Цей стандарт забезпечує безперервне поліпшення енергоефективності через цикл *Plan-Do-Check-Act* і використовується для «низько-» та «високо-» ефективних підприємств [69].

За даними DOE, компанії, які беруть участь у програмі *50001 Ready*, досягають 12 %-го зниження енерговитрат протягом перших 15 місяців після початку впровадження системи енергоменеджменту [73]. Подальші дослідження свідчать, що організації зі сертифікацією ISO 50001 можуть підтримувати 10–20 %-го скорочення споживання протягом 2–3 років [74].

В ЄС проєкт *ENEFIRST* використовує наявність ISO 50001 як ключовий індикатор для позначення «високоєфективних» підприємств (Efficiency First proxy). Це дозволяє цілеспрямовано надавати пільгові кредити, гранти та аудити тим, хто ще не має системи енергоменеджменту, сприяючи рівномірнішому розподілу ресурсів.

Нині *ENEFIRST Plus* тестує операційну реалізацію принципу «енергоефективності на першому місці» у вісьмох кейсах чотирьох країн (Хорватія, Греція, Італія, Польща), щоб потім масштабувати кращі практики на всі 27 Держав-членів ЄС. Це дає змогу отримати практичні рекомендації щодо впровадження системи енергоменеджменту у різних контекстах [75].

Переваги бінарної класифікації: простота адміністрування – перевірити наявність сертифіката або системи менш ресурсоємно, ніж аналіз часових рядів; ясність сигналу для інвесторів і банків – зрозуміло, кому надавати «зелені» фінанси; швидке масштабування політик підтримки по всіх секторах і країнах. Недоліки ж полягають у тому, що бінарні ознаки не відображають реальної поведінки у різні години доби; підприємства можуть сертифікуватись «для галочки» без систематичного зменшення споживання; не враховуються пікові та сезонні коливання, важливі для планування потужностей [74].

У зв'язку з цим рекомендовано поєднувати бінарну класифікацію (*Energy Star*, ISO 50001, *ENEFIRST*) із динамічним аналізом профілів енергоспоживання, щоб політики та оператори мереж могли оцінювати не тільки «факт» сертифікації, але й ефективність у часовому вимірі. Це відкриває шлях до гібридних підходів, що поєднують переваги простоти бінарних індикаторів і глибини часових даних.

Узагальнені характеристики розглянутих підходів до класифікації споживачів енергії наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика підходів до класифікації споживачів енергії (початок)

Підхід	Основний критерій	Типові приклади	Переваги	Обмеження
Нормативні пороги за річним споживанням	Фіксовані ліміти ГВт·год/рік або tce/рік	Пороги енергоаудиту та ISO 50001 у ЄС, статус energivori, схеми BesAR, DDADUE-2025, Top-10 000	Чіткі юридичні зобов'язання, проста адміністрація, прямий зв'язок між обсягом споживання та вимогами	Гнучкість до технологічних змін, ризик «застиглих» порогів, стимул «не виходити» за ліміт
Статистично-квантильна сегментація	Позиція у розподілі (децилі, перцентилі, top-1 %)	Top-1000 / Top-10 000, архетипи домогосподарств (Ofgem), децилі вразливості у SFOE	Адаптація до структурних зрушень, можливість таргетувати верхні 5–10 % споживачів	Потребує регулярного оновлення, складна комунікація для бізнесу й домогосподарств
Класифікація, орієнтована на дані (кластеризація профілів)	Форма й варіативність добового/річного профілю, участь у програмах відповіді на попит	K-means, DTW, SOM у пілотах SmartGrid (Фінляндія, Велика Британія тощо)	Автоматичне виявлення «природних» груп, можливість комбінувати технічні й поведінкові ознаки	Високі вимоги до якості й обсягу смарт-даних, чутливість до вибору алгоритму та параметрів

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика підходів до класифікації споживачів енергії (продовження табл.)

Підхід	Основний критерій	Типові приклади	Переваги	Обмеження
Інтенсивні індикатори	Витрати на енергію / ВДВ, кВт·год/млн € ВДВ, частка енерговитрат у собівартості	CEEAG, схеми компенсації надбавок в Іспанії, Німеччині, Великій Британії	Фокус на справді енергоємних виробництвах, зв'язок підтримки з економічною ефективністю бізнесу	Високі адміністративні витрати на підтвердження показників, потреба в регулярному перегляді порогів
Секторально-матрична класифікація IEA 4×4	Перетин секторів (домогосподарства, послуги, промисловість, транспорт) і кінцевих використань (тепло, пристрої, транспорт, процеси)	База World Energy Balances, секторальний аналіз програм енергоефективності і тарифних реформ	Дозволяє ідентифікувати енергоємні «вузли» попиту, добре поєднується зі сценарним моделюванням	Значні вимоги до стандартизації й деталізації даних, потреба в розвиненій IT-інфраструктурі
Класифікація за режимом навантаження	Рівень і тривалість навантаження (базове, проміжне, пікове), часові зони споживання	Поділ на базове/проміжне/пікове навантаження, тарифні зони «пік-поза піком-плече», аналіз кривої тривалості навантаження (LDC)	Універсальний інструмент для планування потужностей, диференційованих тарифів і програм DR, безпосередньо пов'язаний із операційною роботою енергосистеми	Потребує детальних часових рядів, розвиненої IT-інфраструктури та алгоритмів обробки великих масивів профілів
Класифікація за рівнем енергоефективності	Статус сертифікації та/або системи енергоменеджменту (наявність ISO 50001, EMAS, Energy Star тощо)	Energy Star, ISO 50001, національні енергетичні сертифікати будівель, програми бенчмаркування EPA	Дуже проста комунікація, чіткий сигнал ринку, можливість швидкого запуску політик підтримки та «зеленого» фінансування	Бінарність не враховує часові та поведінкові аспекти споживання, значна частина споживачів залишається «поза радаром» до сертифікації

7. Оцінка можливості адаптації до українських умов

Україна стоїть перед завданням побудови власної системи класифікації енергоспоживачів, яка б поєднувала міжнародний досвід із вітчизняними реаліями. На відміну від розвинених ринків, де широко застосовуються детальні схеми секторної, часової та класифікації на основі ефективності, український контекст характеризується обмеженими даними та високою часткою традиційного обліку. Водночас імплементація європейських підходів стає дедалі важливішою в рамках євроінтеграційних процесів та відновлення енергетичної інфраструктури після руйнувань [76].

За даними IEA, у 2023 р. на житловий сектор припадало 33% кінцевого енергоспоживання, а на промисловість – 22%, як показано на рис. 1 [77]. Транспорт та комерційні послуги формують більшу частину решти, при цьому житловий попит відзначається сильною сезонністю через потребу в опаленні.



Рисунок 1 – Загальне кінцеве споживання енергії в Україні за 2023 рік [77]

Більше половини промислового споживання генерує важка промисловість, зокрема металургія та хімічний сектор, де окремі заводи можуть споживати понад 10 ТВт·год/рік. Це створює виражені піки навантаження й вимагає адаптивних механізмів балансування мережі [76].

Водночас реалізувати детальну класифікацію за режимами або квартілями навантаження в Україні наразі ускладнює недостатнє охоплення смарт-лічильниками – лише близько 20 % точок обліку оснащені автоматизованою системою збору й передавання даних про споживання (АСЗПДС) в режимі майже реального часу [78], тоді як у розвинених країнах ця цифра перевищує 50% [79]. Схожа проблема існує в газовому секторі, де комп'ютеризованими приладами обліку обладнано менше 1% лічильників, що не дає змоги поєднувати електро- і газові дані для мультиенергетичних рішень [80]. Крім того, істотна нерівномірність секторів – надвелика частка важкої промисловості і відносно невелика вага малого та середнього бізнесу – робить небажаним застосування «універсального» підходу до всіх підприємств галузі [81].

У таких умовах доцільно розпочати з максимально простої моделі класифікації за річним обсягом споживання, яка не вимагає повної цифровізації обліку. На першому етапі пропонується трирівнева схема:

- домогосподарства та дрібні споживачі з річним попитом до 1 ГВт·год;
- малі й середні підприємства зі споживанням від 1 до 10 ГВт·год;
- великі енергоємні споживачі з понад 10 ГВт·год на рік.

Пороги 1 та 10 ГВт·год обрано як компроміс між жорсткими нормативними межами для енергоємних підприємств у ЄС (2,75–23,6 ГВт·год) та фактичною структурою української промисловості, де значна частина споживачів має суттєво менші обсяги споживання. Ці значення орієнтовно відповідають поточному розподілу великих і середніх споживачів за даними Держстату та оператора системи передачі, що дозволяє використати наявну статистику без додаткових вимог до даних. Така початкова трирівнева схема дає змогу швидко диференціювати тарифи, умови доступу до кредитних і грантових програм, а також вимоги до енергоаудиту й енергоменеджменту, не чекаючи повного поширення смарт-лічильників. У міру появи більш деталізованих даних систему можна поступово ускладнити, розширивши класифікацію до п'яти рівнів: домогосподарства, малий бізнес (до 0,5 ГВт·год), середні споживачі (0,5–5 ГВт·год), великі підприємства (5–20 ГВт·год) та «мегаспоживачі» із понад 20 ГВт·год. Такий поділ дасть змогу тонше таргетувати субсидії, кредити під енергоефективні проекти та обов'язкові енергоаудити для енергоємних підприємств.

В якості індикаторів ефективності можна використовувати наявність сертифікації *ISO 50001* або відзнаки *Energy Star*. Організації з системою енергоменеджменту за *ISO 50001* довели здатність скорочувати споживання на 10–20 % протягом перших років впровадження, а *Energy Star*-сертифіковані будівлі показують суттєво нижчий фінансовий ризик. Така бінарна ознака полегшить адміністрування й надасть зрозумілий сигнал для «зеленого» фінансування.

Реалізувати модель найкраще через пілотні проекти в регіонах із найвищим рівнем цифровізації – наприклад, Київщина або Дніпропетровщина, де вже встановлено понад мільйон «розумних» лічильників. Це дозволить відпрацювати процедури збору, обробки та аналізу даних, а також протестувати вплив різних тарифних стимулів на перші групи споживачів.

Наступним кроком є стандартизація порогів та процедур: слід ухвалити на рівні урядових постанов чіткі критерії потужності, визначити строки та алгоритми передачі даних операторам і регулятору. Після успішного пілотування можна запуснути поетапне розгортання по всій країні, інтегруючи досвід *ENEFIRST Plus* у Східній Європі та використовуючи міжнародне фінансування (EIB, USAID, GIZ) для модернізації мереж.

Ключовим компонентом довгострокового успіху стане створення єдиного ІТ-кластеру для агрегації даних з усіх лічильників і застосування алгоритмічних методів аналізу профілів енергоспоживання. Це відкриє шлях до майбутніх удосконалень – реалізації кластерних, квантильних та часових моделей, які вже добре зарекомендували себе в інших країнах.

Зрештою, запропонована спрощена, але гнучка система дозволить Україні швидко реалізувати базову класифікацію, водночас заклавши фундамент для подальшої еволюції у бік детальних, динамічних методів аналізу енергоспоживання.

8. Потенціал застосування класифікації

Класифікація споживачів за обсягом споживання та профілем навантаження дозволяє виявити найбільш гнучкі сегменти, які здатні знизити піковий попит або перенести споживання в періоди низького навантаження. Це основа для програм управління попитом, що поєднують технологічні рішення (наприклад, системи накопичення енергії чи автоматизоване керування кліматом) із ціновими сигналами. У дослідженні NREL показано, що точне сегментування навантаження й обсягу споживання збільшує ефективність таких програм до 15–20 %, одночасно знижуючи потребу в дорогих пікових потужностях [82].

Вдалими прикладами є програми *Bonneville Power Administration* [83] та *Sacramento Municipal Utility District (SMUD)* [84], які на основі класифікації домогосподарств за середнім та піковим навантаженням

реалізували гнучкі тарифні схеми і досягли зниження пікового попиту на 5–10 % без втрат у загальному обсязі споживання.

На рівні громад, сегментація споживачів за типом будівель, обсягом споживання та шаблонами навантаження дає змогу створювати Стратегічні плани розвитку енергетики громади (СПРЕГ), що враховують особливості забудови, клімату та інфраструктури. У керівництві DOE зі СПРЕГ описано процедуру збору даних, сегментування за кліматичною зоною та видом споживання і розробки сценаріїв локальних генеруючих заходів та заходів управління попитом [85].

Аналітичні шаблони рекомендують розбивати громади на житлові, комерційні та змішані райони, а потім знаходити ключові «точки впливу» – будівлі чи підприємства з високим потенціалом заощадження, аби сфокусувати початкові інвестиції й інформаційні кампанії.

Наприклад, у *Broward County* (Флорида) СПРЕГ почався з енергійного профілювання, що дозволило пріоритезувати будівлі з найбільшим потенціалом енергоощадності та визначати коротко- й довгострокові заходи для зниження викидів і витрат [86].

Маркетинговий підхід до сегментації споживачів, застосований у програмі *Better Buildings Neighborhood*, передбачає класифікацію за демографією, обсягом споживання та ставленням до енергоощадності. Ця методика допомогла розробити чіткі пакети стимулів для кожного сегменту, підвищивши залучення інвестицій на 25% порівняно з уніфікованими пропозиціями [87].

У м. Чикаго для багатоквартирних будинків застосували спеціальне сегментування за віком забудови, формою власності та рівнем енергоспоживання, що дозволило збільшити ефективність програм модернізації на 30% та спрямувати бюджети першочергово на найризиковіші об'єкти [88].

Таким чином, адаптована класифікація споживачів стає потужним інструментом не тільки для зниження піків і балансування мережі, а й для формування регіональних стратегій та ефективного розподілу ресурсів у програмах енергоефективності, хоча для її реалізації потрібні високочастотні дані та відповідна IT-інфраструктура.

В Україні потенціал застосування такої класифікації полягає в використанні існуючої АСЗПДС – хоча вона покриває обмежену кількість точок обліку, її розширення в рамках реформ ДП «Укренерго» і USAID ESP дозволить сегментувати житлові та комерційні споживчі профілі для тестування *Time-of-Use*-тарифів і програми «реагування на попит», що особливо актуально в зимовий пік; водночас інтеграція з матрицею 4×4 від IEA на рівні громад може стати основою для локальних СПРЕГ із фокусом на критичні інфраструктурні об'єкти й пільгові кредити під *ISO 50001* чи *Energy Star* – сертифікацію [89].

Ключовим драйвером впровадження класифікації в Україні може стати Стратегія розвитку розподіленої генерації до 2035 р., затверджена Кабінетом Міністрів на основі рекомендацій USAID ESP, яка передбачає стимулювання малих та середніх енергогенеруючих об'єктів (< 20 МВт) [90].

Інтеграція положень *Electricity Integration Package* [91] у національне законодавство, якою опікується USAID ESP, відкриває шлях до сегментації споживачів у рамках нових правил тарифоутворення та балансування – зокрема, розподіл на категорії за обсягом і режимом споживання дозволить точніше формувати коефіцієнти втрат і розрахунки диспетчеризації.

Розширення проникнення АСЗПДС до рівня хоча б 40% точок обліку, як це було рекомендовано в аналізах Omdia і FERC для регіонів з подібною інфраструктурою, стане критерієм для переходу до детального сегментування за режимами навантаження й запуску пілотних проєктів у містах-мільйонниках.

На рівні громад класифікацію можна застосувати для розробки локальних стратегічних планів: спочатку – на базі наявних смарт-лічильників і статистики, потім – із залученням інвесторів для монтажу додаткових пристроїв і впровадження програм управління попитом.

Для промисловості впровадження спрощеної трирівневої системи класифікації відкриє можливість запуску цільових кредитних ліній під модернізацію та грантів «енергоефективності на першому місці», орієнтованих на середні та великі підприємства з річним споживанням понад 1 ГВт·год.

Пілотні проєкти в міжнародній співпраці можуть започаткувати класифікацію на територіях із розвинутою інфраструктурою (Київська, Львівська обл.) та поступово поширювати досвід на менш цифровізовані райони.

У середньостроковій перспективі єдина IT-платформа для агрегації даних споживання, як це передбачає «Енергетична безпека України» від USAID ESP [92], дозволить оперативно застосовувати класифікацію не лише для управління попитом і тарифів, а й для прогнозової аналітики, планування інвестицій у мережеві потужності та оцінки ефективності «зелених» програм.

9. Висновки

У статті систематизовано основні підходи до класифікації споживачів енергії, які застосовуються в міжнародній практиці: нормативні пороги за обсягом споживання, статистично-квантильну сегментацію, класифікацію на основі профілів навантаження (кластеризація), інтенсивні індикатори (витрати на енергію/ВДВ), секторально-матричний підхід IEA 4×4, а також класифікацію за режимом навантаження і рівнем енергоефективності. Показано, що ці підходи не конкурують між собою, а формують

взаємодоповнюваний набір інструментів для енергетичної політики, тарифоутворення та програм реагування на попит.

На основі огляду практик ЄС, США, Китаю, Великої Британії, Швейцарії, Мексики та інших країн запропоновано рамку адаптації класифікації споживачів до умов України. Ключовим елементом є спрощена трирівнева схема за річним споживанням (домогосподарства і дрібні споживачі; малі й середні підприємства; великі енергоємні споживачі) з можливістю поетапного переходу до п'ятирівневої структури. Вибір порогів 1 та 10 ГВт·год обґрунтовано як компроміс між європейськими нормативами для енергоємних підприємств і фактичним розподілом українських споживачів, що дозволяє спиратися на існуючу статистику без повної цифровізації енергообліку.

Запропонована класифікаційна рамка може бути використана для диференціації тарифів, визначення пріоритетних груп у програмах підтримки енергоефективності, проєктування механізмів компенсації надбавок і податків на електроенергію, а також для запуску й масштабування програм реагування на попит. Структурований поділ споживачів створює «місток» між агрегованими енергетичними балансами та мікрорівнем, на якому ухвалюються інвестиційні та управлінські рішення, і тим самим підвищує керованість та передбачуваність попиту в умовах післявоєнного відновлення енергосистеми України.

Проведений огляд має низку обмежень. Значна частина кількісних прикладів ґрунтується на зарубіжних програмах, тоді як детальні українські дані щодо розподілу споживачів за обсягами й профілями навантаження наразі доступні лише фрагментарно через низьке проникнення смарт-лічильників та обмежену відкритість мікроданих. Запропоновані порогові значення мають переважно концептуальний характер і потребують емпіричної валідації на основі реальних вибірок споживачів різних секторів.

У подальших дослідженнях доцільно поєднати порогову класифікацію з алгоритмічною кластеризацією добових профілів, оцінити вплив різних варіантів сегментації на результати сценарного моделювання навантажень і ефективність програм управління попитом, а також розробити поетапну дорожню карту переходу від простої української типології до більш гнучких, статистично орієнтованих підходів.

Список використаної літератури

1. Lund H. Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of Fully Decarbonized Societies. – 3rd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2024. – 398 p. – ISBN 978-0-443-14137-9 (Hardback), ISBN 978-0-443-14136-2 (eBook).
2. Ahmed S., Ali A., D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations // Sustainability. – 2024. – Т. 16, № 5. – С. 1749. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su16051749>.
3. Mohammadi M., Mohammadi A. Empowering Distributed Solutions in Renewable Energy Systems and Grid Optimization // Amini M.H. (ред.) Distributed Machine Learning and Computing. – Cham: Springer, 2024. – Т. 2 (Big and Integrated Artificial Intelligence). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-57567-9_7.
4. Ibrahim M.M. Energy management strategies of hybrid renewable energy systems: A review // Wind Engineering. – 2023. – Т. 48, № 1. – С. 133–161. – DOI: <https://doi.org/10.1177/0309524X231200010>.
5. Chen W.-A., Chen Ch.-F., Tomasik S. Investigating intentions and barriers in adopting decentralized home energy management systems: A justice dimension of demand flexibility // Energy and Buildings. – 2024. – Т. 318. – С. 114458. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114458>.
6. Koukaras P., Afentoulis K.D., Gkaidatzis P.A., Mystakidis A., Ioannidis D., Vagropoulos S.I., Tjortjis C. Integrating Blockchain in Smart Grids for Enhanced Demand Response: Challenges, Strategies, and Future Directions // Energies. – 2024. – Т. 17, № 5. – С. 1007. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051007>.
7. Papadaki A., Savvakis N., Sifakis N., Arampatzis G. Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems for European islands: Market Dynamics, Opportunities and Challenges // Sustainable Futures. – 2025. – Т. 9. – С. 100601. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100601>.
8. Almihat M.G.M., Munda J.L. The Role of Smart Grid Technologies in Urban and Sustainable Energy Planning // Energies. – 2025. – Т. 18, № 7. – С. 1618. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071618>.
9. Meng L., Li M., Yang H. Enhancing energy efficiency in distributed systems with hybrid energy storage // Energy. – 2024. – Т. 305. – С. 132197. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132197>.
10. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2024. – Paris: IEA, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>. – Ліцензія: CC BY 4.0.
11. International Energy Agency (IEA). Tracking energy efficiency investment progress. – Париж: IEA, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-efficiency-investment-progress>. – Ліцензія: CC BY 4.0.
12. European Commission: Directorate-General for Energy, Dunglas S., Barberi P., Andrey C., Jerphanion G. de. METIS 3 study S7 – The role of regional energy networks in a decarbonised European energy system. – Люксембург: Publications Office of the European Union, 2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/5222915>.

13. European Commission: Directorate-General for Energy, Cornelis M. Framing summer energy poverty – Insights and recommendations for a resilient future. Final report. – Люксембург: Publications Office of the European Union, 2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/3135617>.
14. World Bank. Selecting and Implementing Demand Response Programs to Support Grid Flexibility: A Guidance Note for Practitioners. – Вашингтон, D.C.: World Bank Group. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://documents.worldbank.org/curated/en/099647511282438850>.
15. Roshan A., Ganga D. Intelligent categorization and interactive mechanism for smart demand side management of residential consumers // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2024. – Т. 37. – С. 101255. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101255>.
16. Koukouvinos K.G., Koukouvinos G.K., Chalkiadakis P., Kaminaris S.D., Orfanos V.A., Rimpas D. Evaluating the Performance of Smart Meters: Insights into Energy Management, Dynamic Pricing and Consumer Behavior // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 960. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020960>.
17. Michalakopoulos V., Sarma S., Papias I., Skaloumpakis P., Marinakis V., Doukas H. A machine learning-based framework for clustering residential electricity load profiles to enhance demand response programs // Applied Energy. – 2024. – Т. 361. – С. 122943. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122943>.
18. Seo K., Na H.S., Lee W., Chen Ch.-B., Kweon S.J., Zhao L., Kumara S. Clustering electricity consumption patterns using functional data analysis // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2025. – Т. 43. – С. 101742. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101742>.
19. Liu Y., Zeng B., Long K., Wu W. Enhancing Electric Bus Charging Scheduling: An Energy-Integrated Dynamic Bus Replacement Strategy with Time-of-Use Pricing // Sustainability. – 2024. – Т. 16, № 8. – С. 3334. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083334>.
20. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. – Official Journal of the European Union. – 2012. – L 315. – С. 1–56. – Оpubліковано 14.11.2012. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>.
21. Mandel T., Pató Z., Broc J.S. та ін. Conceptualising the energy efficiency first principle: insights from theory and practice // Energy Efficiency. – 2022. – Т. 15. – С. 41. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10053-w>.
22. European Council for an Energy Efficient Economy (eceee). eceee [Електронний ресурс]. – Стокгольм, Швеція: eceee, 1993–. – Режим доступу: <https://www.eceee.org/>.
23. Maistrenko N., Zavgorodnia M., Sheludko E., Galaieva L. Energy Consumption in Key Sectors of the Processing Industry: Current State and Prospects for the Post-war Future // Babak V., Zaporozhets A. (ред.) Systems, Decision and Control in Energy VII. – Cham: Springer, 2025. – Т. 596 (Studies in Systems, Decision and Control). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-90462-2_4.
24. Майстренко Н.Ю. Прогнозування енергоспоживання для сектора загального державного управління в економіці України до 2040 року // Системні дослідження в енергетиці. – 2022. – № 1–2 (68–69). – С. 82–89. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.082>.
25. Жувагіна І. Забезпечення ефективної політики енергоефективності на основі відповідних систем енергоаудиту // European Science. – 2024. – № 3 (sge27-03). – С. 44–71. – DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-27-00-005>.
26. Ткач М. Прагматика ефективності системи енергоменеджменту суб'єктів господарювання // Економіка та суспільство. – 2024. – № 68. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-127>.
27. Постол Ю.О., Гулевський В.Б., Постол О.О. Підвищення енергоефективності житлового сектору // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 121–129. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-10>.
28. Муніципальний енергетичний план Сосницької громади Корюківського району Чернігівської області. – Сосниця, грудень 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sosnitsa-rada.gov.ua/storage/documents/documents/3bd084fe8a71c005f44c62800dfe247e.pdf>.
29. Проект USAID «Підвищення ефективності роботи і підзвітності органів місцевого самоврядування» («ГОВЕРЛА»). Рекомендації для органів місцевого самоврядування з впровадження енергоефективних заходів на рівні територіальних громад. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://decentralization.ua/uploads/attachment/document/1120/Recommendations_on_Energy_Efficiency_Measures_in_Municipalities.pdf.
30. EN 17267:2019. Energy measurement and monitoring plan – Design and implementation – Principles for energy data collection. – Брюссель: CEN, 2019. – 24 с. – (ICS: 03.100.01; 27.010). – Стан: чинний. – Оpubліковано: 13 вересня 2019 р.
31. Проект Національного плану з енергетики та клімату України 2025–2030. – Київ: Міністерство економіки України, 14.02.2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?id=f7088035-142e-4912-9aa0-6fe2def80c1b&lang=uk-UA&title=ProektNatsionalnogoPlanuZEnergetikiTaKlimatuUkraini2025-2030>.
32. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast) (Text with EEA relevance). – Official Journal of the European Union. – 2023. – L 231. – С. 1–111. – Оpubліковано 20.09.2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>.

33. Decreto Legislativo 14 luglio 2020, n. 73. Attuazione della direttiva (UE) 2018/2002 che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. (20G00093) // Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Serie Generale. – 2020. – № 175. – 14.07.2020. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/07/14/20G00093/SG>.

34. Martini Ch., Toro C., Biele E., Herce C. Implementation of energy efficiency measures in industry and enterprises: Public Report. Deliverable 2.2 of the LIFE22-CET-LEAPto11 project / ENEA; за участі ADENE, CRES, dena, EIH, EWA, LEA, RVO, SEAI, SIEA. – Версія: Final. – Рим: ENEA, 2024. – 72 с. – Проєкт: LIFE22-CET-LEAPto11.

35. Norton Rose Fulbright. The Energy Release Decree: Ministerial Decree no. 268/2024 introduces Energy Release 2.0 encouraging new renewables by energy-intensive companies. – Milan: Norton Rose Fulbright, January 2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/24d4e4b5/the-energy-release-decree>.

36. Besondere Ausgleichsregelung bis Leistungsjahr 2023 [Електронний ресурс] // Netztransparenz. – Stuttgart: TransnetBW GmbH. – Режим доступу: <https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/Abwicklungshinweise-und-Umsetzungshilfen/Besondere-Ausgleichsregelung-bis-Leistungsjahr-2023>.

37. Financing under the German Renewable Energy Act (EEG) [Електронний ресурс] // Netztransparenz. – Stuttgart: TransnetBW GmbH. – Режим доступу: <https://www.transnetbw.de/en/energy-market/renewables-and-levies/eeg-support>.

38. Freshfields Bruckhaus Deringer LLP. The amendment of the German Renewable Energy Act (EEG 2021). – Лондон: Freshfields Bruckhaus Deringer LLP, 25 січня 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.freshfields.com/en/our-thinking/briefings/2021/01/the-amendment-of-the-german-renewable-energy-act-eeg-2021-4390>.

39. Energy audit and ISO 50001: changes in French regulations [Електронний ресурс] // Rong Yi Solutions. – Режим доступу: <https://rongyisolutions.com/en/energy-audit-and-iso-50001-changes-in-french-regulations>.

40. Implementing an Effective Energy Management System: The Path to Sustainability with DIN EN ISO 50001:2018 [Електронний ресурс] // M&P Energy GmbH. – Ганновер: M&P Energy GmbH, 27.01.2025. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mup-energy.com/en/implementing-an-effective-energy-management-system-the-path-to-sustainability-with-din-en-iso-500012018>.

41. Romiti J., Negro C., Di Santo D. D4.1 Inventory and categorisation of funding opportunities analysis for energy efficiency: Public Report / FIRE; за рецензією ІЕЕСР. – У межах проєкту DEESME2050: Developing Energy Efficiency Projects in SMEs for European 2050 targets. – 20 лютого 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ieecp.org/projects/deesme2050/>.

42. Wright A., Martin M., Gemmer B., Scheihing P., Quinn J. Results from the U.S. DOE 2006 Save Energy Now Assessment Initiative: DOE's Partnership with U.S. Industry to Reduce Energy Consumption, Energy Costs, and Carbon Dioxide Emissions. – Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory; U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program, 17 вересня 2007. – 63 с.

43. Implementing a national energy efficiency programme [Електронний ресурс] // NDC Partnership – Knowledge Portal. – Washington, DC: NDC Partnership. – Режим доступу: <https://www.ndcpartnership.org/knowledge-portal/good-practice-database/implementing-national-energy-efficiency-programme>.

44. Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). Energy Conservation Policies & Measures in Japan. – Tokyo: METI, 7 жовтня 2009. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.apec.org/docs/default-source/satellite/EGEEEC/Files/EGEEEC34_session_5_economy_report_Japan.pdf

45. Ministry of Power, Government of India. Achievements under Perform, Achieve and Trade (PAT). – Нью-Делі: Bureau of Energy Efficiency (BEE), травень 2017. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://beeindia.gov.in/sites/default/files/Booklet_Achievements%20under%20PAT_May%202017.pdf.

46. Sala S., Benini L., Beylot A., Castellani V., Cerutti A., Corrado S., Crenna E., Diaconu E., Sanyé-Mengual E., Secchi M., Sinkko T., Pant R. Consumption and Consumer Footprint: methodology and results. Indicators and Assessment of the environmental impact of EU consumption. – Люксембург: Publications Office of the European Union, 2019. – ISBN 978-92-79-97256-0. – DOI: 10.2760/98570. – JRC 113607.

47. Price L., Wang X., Yun J. China's Top-1000 Energy-Consuming Enterprises Program: Reducing Energy Consumption of the 1000 Largest Industrial Enterprises in China / Lawrence Berkeley National Laboratory, Peking University, China Energy Conservation Association. – Берклі: Environmental Energy Technologies Division, червень 2008. – 40 с.

48. Ofgem energy consumer archetypes update 2024 [Електронний ресурс] // Ofgem. – Лондон: Office of Gas and Electricity Markets, лютий 2024. – 120 с. – Режим доступу: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/2024-02/Ofgem_archetypes_update_2024_FinalReport_v4.1.3.pdf.

49. Landis F. Distributional Impacts of Swiss Climate Policy. – Winterthur: ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, April 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/30465/1/2024_Landis_Distributional-impacts-of-Swiss-climate-policy.pdf. – DOI: 10.21256/zhaw-30465.

50. Sunderland L., Jahn A., Hogan M., Rosenow J., Cowart R. Equity in the energy transition: Who pays and who benefits? – Брюссель: Regulatory Assistance Project (RAP), травень 2020. – 64 с.
51. Okereke G.E., Bali M.C., Okwueze C.N. та ін. K-means clustering of electricity consumers using time-domain features from smart meter data // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2023. – Т. 10. – С. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00068-3>.
52. Kaur R., Gabrijelčić D. Behavior segmentation of electricity consumption patterns: A cluster analytical approach // Knowledge-Based Systems. – 2022. – Т. 251. – С. 109236. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109236>.
53. Guan Y., Zhang H., Jin Y., Zhou S. Classification and Analysis of Users' Electricity Consumption Behavior Using Cluster Analysis Algorithm // Journal of Engineering Science. – 2024. – Т. 20, № 9s. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/4594>.
54. Commission Recommendation (EU) 2024/2002 of 24 July 2024 setting out guidelines for the interpretation of Article 11 of Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council as regards energy management systems and energy audits (notified under document C/2024/5155). – Official Journal of the European Union. – 2024. – L 2024/2002. – Опубліковано 26.07.2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/reco/2024/2002/oj>.
55. Council Regulation (EU) 2022/1854 of 6 October 2022 on an emergency intervention to address high energy prices. – Official Journal of the European Union. – 2022. – L 261I. – С. 1–21. – Опубліковано 07.10.2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/reg/2022/1854/oj>.
56. European Commission. Guidelines on State aid for climate, environmental protection and energy 2022 (2022/C 80/01) // Official Journal of the European Union. – 2022. – С 80. – С. 89. – Опубліковано 18.02.2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52022XC0218%2803%29>.
57. European Commission. 2023 Country Report – Spain. Commission Staff Working Document (SWD(2023) 609 final), 24 травня 2023. – Брюссель: European Commission, 2023. – 88 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://economy-finance.ec.europa.eu/system/files/2023-06/ip233_en.pdf.
58. VREG (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt). A European comparison of electricity and natural gas prices for residential, small professional and large industrial consumers: Final report. – Брюссель: VREG, травень 2020. – 335 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vlaamsenutsregulator.be/sites/default/files/document/rapp-2020-11.pdf>.
59. House of Commons Environmental Audit Committee. Energy Intensive Industries Compensation Scheme: Written evidence. – Лондон: UK Parliament, 22 листопада 2012. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201213/cmselect/cmenvaud/writev/669/669.pdf>.
60. International Energy Agency (IEA). World Energy Balances. Database documentation. April 2025 edition. – Париж: IEA, квітень 2025. – 434 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/fddaf908-1716-431b-ab9b-a21f7a6cdd76/WorldEnergyBalancesdocumentationApril2025edition.pdf>.
61. International Energy Agency (IEA). Denmark 2023. – Париж: IEA, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/denmark-2023>. – Ліцензія: CC BY 4.0.
62. E.ON. E.ON pilot project for dynamic pricing in Copenhagen enters commercial phase. – 27 лютого 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eon.com/en/innovation/innovation-frontline/innovation-news/eon-pilot-project-for-dynamic-pricing-in-copenhagen-enters-commercial-phase.html>.
63. U.S. Energy Information Administration (EIA). Glossary [Електронний ресурс]. – Вашингтон: EIA. – Режим доступу: <https://www.eia.gov/tools/glossary/?id=B>.
64. U.S. Energy Information Administration (EIA). Hourly electricity consumption varies throughout the day and across seasons. – 21 лютого 2020. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=42915>.
65. U.S. Energy Information Administration (EIA). Use of natural gas-fired generation differs in the United States by technology and region. – 22 лютого 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61444>.
66. Döring M. Package 'standardlastprofile': Data Package for BDEW Standard Load Profiles in Electricity. Version 1.0.0 [Електронний ресурс] // CRAN. – 11 грудня 2023. – Ліцензія: CC0.
67. Load Profiles [Електронний ресурс] // AEMO – Australian Energy Market Operator. – Мельбурн: АЕМО. – Режим доступу: <https://aemo.com.au/energy-systems/electricity/national-electricity-market-nem/data-nem/metering-data/load-profiles>.
68. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (Australia). Position Paper: Sample metering and Controlled Load Profiles. – Сідней: DCCEEW, квітень 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy.nsw.gov.au/sites/default/files/2024-04/202404-DCCEEW-position-paper-controlled-load-profiles-and-sample-meters.pdf>.
69. ISO. ISO 50001 – Energy management [Електронний ресурс] // ISO. – Женева: ISO. – Режим доступу: <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html>.
70. Energy Efficient Products. ENERGY STAR [Електронний ресурс] // ENERGY STAR. – Вашингтон, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. – Режим доступу: <https://www.energystar.gov>.

71. Dutrow E. Benchmarking Industrial Plant Energy Efficiency: How EPA's ENERGY STAR® Program Helps Industry Improve Energy Efficiency / U.S. Environmental Protection Agency, ENERGY STAR Industrial Partnership. – Вашингтон, D.C.: EPA, 26 травня 2010. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-01/documents/energy_star_5_26_10.pdf.
72. Zimmer A., Ha H. Buildings and Infrastructure from a Sustainability Perspective. Sustainable and Healthy Communities Program – Theme 4.1.1. – Internal EPA Report (EPA/600/X-14/369). – Ролі: Anthony Zimmer, HakSoo Ha (ORISE Fellow). – Вашингтон, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, вересень 2014. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/buildingsandinfrastructurefromasustainabilityperspective.pdf>.
73. U.S. Department of Energy, Sustainability Performance Office. Learn more about the Benefits of ISO 50001 & DOE's 50001 Ready [Електронний ресурс]. – Вашингтон, D.C.: DOE, 2018 (останні зміни). – Режим доступу: <https://www.energy.gov/management/osp/articles/does-50001-ready-program>.
74. Fuchs H., Aghajanzadeh A., Therkelsen P. Identification of drivers, benefits, and challenges of ISO 50001 through case study content analysis // Energy Policy. – 2020. – Т. 142. – С. 111443. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111443>.
75. ENEFIRST + Plug Energy Efficiency First In. – У межах проєкту ІЕЕС Р (ENEFIRST+ Plug), період: листопад 2023 – жовтень 2026. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ieecp.org/projects/enefirst-2>.
76. United Nations Economic Commission for Europe. Rebuilding Ukraine with a Resilient, Carbon-Neutral Energy System. – Женева: United Nations, 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://unece.org/sites/default/files/2023-07/EN_Rebuilding%20Ukraine%20with%20a%20Resilient%20Carbon-Neutral%20Energy%20System_V8.pdf
77. International Energy Agency (IEA). Understanding energy end uses [Електронний ресурс] // Ukraine – Countries & Regions – Efficiency & demand. – Париж: IEA. – Режим доступу: <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>.
78. Krishnan A. Smart electricity meter market 2024: Global adoption landscape [Електронний ресурс] // IoT Analytics. – Гамбург: IoT Analytics GmbH, 21 лютого 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iot-analytics.com/smart-meter-adoption>.
79. Smart grids and meters [Електронний ресурс] // European Commission, Directorate-General for Energy. – Брюссель: EC DG Energy. – Режим доступу: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en.
80. Berg Insight. The penetration rate of smart gas meters in Europe reached 45 percent in 2023. – 7 березня 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.berginsight.com/the-penetration-rate-of-smart-gas-meters-in-europe-reached-45-percent-in-2023>.
81. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2023: Primary annual analysis of global developments in energy efficiency markets and policy. – Париж: IEA, червень 2023. – 126 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9fbf4/EnergyEfficiency2023.pdf>.
82. Ma O., Cheung K., Alkadi N. та ін. Demand Response and Energy Storage Integration Study / Office of Energy Efficiency and Renewable Energy & Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. – Вашингтон, D.C.: U.S. Department of Energy, 2016 (DOE-EE-1282). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy.gov/eere/analysis/demand-response-and-energy-storage-integration-study>.
83. Bonneville Power Administration. BPA Overview / Corrina Ikakoula, Tribal Account Executive; у межах DOE Tribal Energy Program Review. – Вашингтон, D.C.: U.S. Department of Energy, січень 2016. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/0911review_ikakoula.pdf.
84. American Public Power Association. Moving Ahead with Time of Use Rates [Електронний ресурс] // American Public Power Association. – Арлінгтон, VA. – 27 с. – Режим доступу: <https://www.publicpower.org/system/files/documents/Moving-Ahead-Time-of-Use-Rates.pdf>.
85. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy; Oak Ridge National Laboratory; Vermont Energy Investment Corporation. Guide to Community Energy Strategic Planning: Introduction to Community Energy Strategic Planning. – Вашингтон, D.C.: DOE, березень 2013. – 7 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/cesp_guide_intro.pdf.
86. Broward County CESP Leadership Team. Broward County Community Energy Strategic Plan (CESP). – Broward County, Fla.: Southeast Florida Regional Climate Change Compact, 20 листопада 2014. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://southeastfloridacclimatecompact.org/wp-content/uploads/2022/02/Broward-County_CommunityEnergyStrategicPlan.pdf.
87. Moss S.J., за участю Fleisher K. Market Segmentation and Energy Efficiency Program Design / Підготовлено для CIEE Behavior and Energy Program; ред. Vine E. – Окланд, Каліфорнія: California Institute for Energy and Environment, листопад 2008. – 49 с.
88. Corso A., Garascia M., Scheu R. Segmenting Chicago Multifamily Housing to Improve Energy Efficiency Programs. – Chicago: Elevate Energy; за підтримки Energy Efficiency for All (EEFA), січень 2017. – 30 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.elevatenp.org/wp-content/uploads/Chicago-Multifamily-Segmentation.pdf>.

89. International Energy Agency (IEA). Ukraine's Energy Security and the Coming Winter: An energy action plan for Ukraine and its partners. – Париж: IEA, вересень 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cec49dc2-7d04-442f-92aa-54c18e6f51d6/UkrainesEnergySecurityandtheComingWinter.pdf>.

90. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 липня 2024 р. № 713-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/713-2024-%D1%80> (дата звернення: 17.07.2025).

91. USAID Energy Security Project. USAID ESP Helps Ukraine to Implement the Electricity Integration Package [Електронний ресурс]. – 23 серпня 2024. – Режим доступу: <https://energysecurityua.org/news/usaids-esp-helps-ukraine-to-implement-the-electricity-integration-package/>.

92. USAID Проєкт енергетичної безпеки (ПЕБ) [Електронний ресурс] – Київ: USAID ПЕБ / Tetra Tech ES, Inc., без дати. – Режим доступу: <https://energysecurityua.org/ua/pro-nas>.

D. Matushkin¹, Ph. D., ORCID 0000-0003-4431-7862

¹**General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine**

ENERGY CONSUMERS CLASSIFICATION AS A TOOL FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY: ADAPTATION OF INTERNATIONAL PRACTICES FOR UKRAINE

This article presents a systematic review of the principal approaches to classifying energy consumers employed worldwide to enhance the efficiency of power-system management. We examine sector-based classification, load-profile segmentation with demand-response potential – shown by NREL studies to improve program effectiveness by 15–20 % – and efficiency-level categorisation (Energy Star, ISO 50001), which can deliver 10–20 % savings within the first years of implementation. We also analyse marketing-driven segmentation techniques that boost participant engagement by 25–30 %, as well as U.S. case studies of time-of-use tariffs and demand-response schemes that reduce peak demand by 5–10 %. In the Ukrainian context, detailed segmentation is constrained by only ≈ 20 % penetration of advanced metering infrastructure and an uneven industrial structure. Accordingly, we propose a simplified three-tier classification with scope to expand to five categories for finer targeting of tariffs, audits, and support programs. The findings can inform the development of national energy efficiency policies, load forecasting scenarios, differentiated tariff structures, demand-management initiatives, and municipal development strategies. By integrating sectoral, temporal, and efficiency-based classification methods, this framework provides a platform for realising the principle of “energy efficiency first” in Ukraine.

Keywords: consumer classification, energy efficiency, demand-side management, energy policy, energy consumption.

Надійшла: 18.07.2025

Received: 18.07.2025

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАСАДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЗІ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Статтю присвячено оптимізації сонячних фотоелектричних систем. Метою статті є аналіз останніх досліджень і сучасних підходів до покращення енергоефективності сонячних станцій.

У статті розглянуто сучасні проблеми роботи сонячних електростанцій в умовах щільної міської забудови, які вимагають інтелектуальних та адаптивних стратегій управління для врахування динамічних експлуатаційних факторів. Представлено інформаційно-орієнтовану систему моделювання та оптимізації для фотоелектричної установки на фасаді готелю «River Park» з використанням PyPSA для моделювання системи та багатоагентного глибокого Q-навчання (DQN) для оптимізації управління. Досліджувана система має потужність 30,2 кВт (постійний струм) та інвертор 30 кВт (змінний струм) із річною генерацією 23,38 МВт·год. Коефіцієнт продуктивності (PR) становить 84,3% на основі метеорологічних даних Meteonorm.

Для підвищення ефективності роботи було розгорнуто багатоагентну систему навчання з підкріпленням (MARL), яка включає три взаємодіючі агенти: агент очищення (для зменшення втрат через забруднення), агент кута нахилу (для максимізації сонячного опромінення) та агент інвертора (для оптимізації ефективності перетворення). Кожен агент навчався у середовищі PyPSA–OpenAI Gym з використанням спеціально розроблених функцій винагороди.

Валідація MARL-системи проводилася шляхом порівняння оригінальної та оптимізованої версій. Результати показали зростання місячної віддачі в енергосистему майже для всіх місяців, стабільне покращення PR, а також суттєве збільшення річного виробітку енергії за умови використання навчання з підкріпленням. Отримані результати підтверджують потенціал модульної MARL-системи для оптимізації фасадних фотоелектричних систем у реальному часі в умовах міських енергетичних систем.

Ключові слова: відновлювана енергетика, інтелектуальне управління, штучний інтелект, машинне навчання, енергетична ефективність, сонячні електростанції, фасадні генераційні системи, комп'ютерне моделювання, адаптивні технології, урбаністична енергетика

Вступ

Зростаючий попит на чисті енергетичні рішення висунув сонячні енергетичні системи в центр глобальних стратегій розвитку відновлюваної енергетики. Хоча фотоелектричні (PV) технології забезпечують значні екологічні переваги, їх широкомасштабне впровадження стикається з істотними викликами, пов'язаними з ефективністю, що стримує реалізацію їхнього повного потенціалу. Сонячні установки функціонують у постійно змінних природно-кліматичних умовах, де такі фактори, як періодична хмарність, сезонні коливання та деградація обладнання, створюють складні оптимізаційні задачі, з якими традиційні системи керування не завжди здатні впоратися ефективно.

Звичайні підходи до управління ґрунтуються на статичних параметрах і реактивних стратегіях технічного обслуговування, що залишає нереалізованими значні резерви підвищення продуктивності. Ці обмеження особливо виявляються в умовах міського середовища, де інтегровані в будівлі сонячні масиви змушені враховувати унікальні мікрокліматичні умови, просторові обмеження та варіативність профілю енергоспоживання. Нездатність динамічно адаптуватися до багатовимірних викликів призводить до субоптимального виробництва енергії, зростання експлуатаційних витрат та скорочення терміну служби систем.

Останні досягнення у сфері обчислювального інтелекту та аналітики даних відкривають нові можливості для трансформації підходів до управління сонячними енергетичними системами. Розробка більш інтелектуальних архітектур керування, здатних обробляти дані про довкілля в режимі реального часу, прогнозувати тенденції продуктивності та автономно коригувати параметри системи, дозволить досягти суттєвого підвищення ефективності. Водночас наявні наукові дослідження ще не запропонували комплексних рішень, що охоплювали б увесь спектр технічних і експлуатаційних завдань та водночас залишалися б придатними для практичної реалізації.

Цей розрив у можливостях оптимізації становить критичний бар'єр на шляху досягнення повного потенціалу сонячної енергетики в глобальному переході до відновлюваних джерел, особливо в умовах

щільної міської забудови, де просторові обмеження та специфіка енергоспоживання створюють особливо складні умови експлуатації. Розвиток більш досконалих методологій керування може суттєво підвищити економічну доцільність і екологічну ефективність виробництва сонячної енергії у світовому масштабі.

Огляд літератури

Сонячні фотоелектричні (PV) системи є ключовим елементом сучасної глобальної енергетики, орієнтованої на розвиток сталих альтернатив. У зв'язку з їх широким розгортанням, забезпечення оптимальної продуктивності розглядається як одне з першочергових завдань наукових досліджень [1]. У цьому контексті під оптимізацією розуміють ефективне регулювання таких факторів, як виробіток енергії, коефіцієнт перетворення потужності, відмовостійкість та баланс між вартістю і ефективністю [2].

Класичні підходи до оптимізації PV-систем включають використання евристичних алгоритмів, математичного програмування та інтелектуальних методів [3]. Ефективність їх реалізації підтверджена рядом досліджень, однак згадувані методи часто втрачають ефективність при коливаннях сонячної радіації та температури [4].

Сучасний етап розвитку обчислювальних методів відкрив нові перспективи через застосування навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) у керуванні PV-системами. RL-алгоритми дозволяють агентам формувати політики на основі взаємодії із середовищем без необхідності явних моделей [5]. Було доведено, що RL-методи можуть ефективно реагувати на атмосферні зміни [6], однак класичні Q-learning-архітектури мають обмежену здатність до узагальнення при масштабуванні [7].

Deep Q-Network (DQN) — гібрид глибинного навчання та Q-learning — ефективно вирішує проблему високорозмірних просторів станів [8]. DQN уже застосовано в задачах МРРТ при частковому затіненні [9], у системах із «розумними» інверторами [10], у гібридних системах зберігання енергії [11], а також у розподілі потужності в мікромережах у реальному часі [12].

Втім, подальший розвиток оптимізаційних систем вимагає багатоагентного підходу (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL). MARL-архітектури дозволяють структурно та функціонально розподіляти інтелект серед компонентів PV-систем [13], що покращує масштабованість і стійкість систем.

Мета статті полягає в розробці та валідації нової багатоагентної системи глибокого навчання з підкріпленням для оптимізації фасадно-інтегрованих фотогальванічних систем у міському середовищі.

Матеріал і результати досліджень

У цьому дослідженні розглянуто ефективність та оптимізацію PV-системи (River Park, фасад) із використанням емпіричних технічних характеристик та інтеграції метеорологічних даних. Система включає модуль з номінальною потужністю на боці постійного струму (DC nameplate) 30,2 кВт та інвертор із номінальною потужністю на боці змінного струму (AC nameplate) 30,0 кВт. Співвідношення DC/AC становить 1,01, що забезпечує майже збалансовану конфігурацію, мінімізуючи втрати від втрати від обрізання інвертором і водночас підтримуючи ефективність інвертора.

Річний виробіток системи становить 23,38 МВт·год при коефіцієнті продуктивності (performance ratio) 84,3%. Цей показник відображає ефективність перетворення сонячної радіації у корисний електричний вихід за заданих експлуатаційних умов. Для врахування кліматичної мінливості та специфічних умов інсоляції було використано метеорологічний набір Typical Meteorological Year (TMY) із просторовою роздільною здатністю 10 км, наданий Meteoporm 7. Це дозволило забезпечити точне моделювання доступності сонячного ресурсу та поведінки системи у часі. Крім того, як ключовий показник ефективності було використано питомий виробіток (specific yield), що становив 773,2 кВт·год/кВтр. Поєднання високоточних метеоданих та документованих технічних параметрів забезпечує надійну методологію моделювання та аналізу роботи PV-системи.

Аналіз втрат

Для оцінки експлуатаційної ефективності PV-системи проведено детальний аналіз втрат на основі результатів моделювання та емпіричних даних. Продуктивність системи було розподілено за категоріями втрат з метою ідентифікації та кількісної оцінки неефективностей. Найбільший внесок у загальні втрати становила втрата від відбиття сонячного світла - 4,7%, далі втрати від невідповідності параметрів фотоелементів — 3,5% та температурні втрати — 3,1%. Ці фактори переважно виникають на рівні модулів і є ключовими для оцінки ефективності конструкції панелей та специфічних умов розташування. Втрати від забруднення та від рівня опромінення становили відповідно 2,0% і 1,7%, що відображає вплив навколишнього середовища та умов технічного обслуговування. Втрати інвертора під час перетворення DC–AC дорівнювали 1,6%.

Незначні втрати зафіксовано в AC-системі та проводці (по 0,1% кожна), що свідчить про ефективність електротехнічного компонування та короткі траси передачі. Важливо відзначити, що втрати від обрізання інвертором та затінення становили 0%, що демонструє оптимальність проєктних рішень щодо розмірності інвертора та розташування панелей без затінення.

Номінальні дані генерації енергії PV-системи були отримані в результаті проведеного процесу моделювання із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення HelioScope.

Як показано в Таблиці 1, щомісячний профіль виробітку енергії PV-системи демонструє виражену сезонну варіативність. Максимальний вихід зафіксовано у липні та серпні, що становив відповідно 2 541,4 кВт·год та 2 545,4 кВт·год. Цей пік збігається з найвищими значеннями опромінення на площину масиву, що підтверджує сильну кореляцію між доступністю сонячного ресурсу та продуктивністю системи.

Таблиця 1 – Значення генерації сонячної енергії помісячно для PV-системи (River Park, фасад).

Місяць	Загальна горизонтальна радіація (kWh/m ²)	Радіація на площину масиву (кВт·год/м ²)	Затінення (kWh/m ²)	Номинальна генерація (kWh)	Генерація в мережу (kWh)
Січень	23	42.3	42.3	1,225.10	1,153.60
Лютий	32.9	48.3	48.3	1,393.20	1,306.60
Березень	77.4	91.1	91.1	2,600.20	2,394.70
Квітень	124.5	93.7	93.7	2,717.80	2,460.50
Травень	156.1	96	96	2,676.40	2,405.70
Червень	171.2	93.2	93.2	2,583.20	2,299.30
Липень	172.6	101.4	101.4	2,853.20	2,541.40
Серпень	139.7	100.3	100.3	2,886.60	2,545.40
Вересень	94.3	91.4	91.4	2,634.60	2,328.40
Жовтень	55.1	76.6	76.6	2,195.30	1,873.60
Листопад	24.5	46.4	46.4	1,221.00	1,108.00
Грудень	14.9	29.5	29.5	858.3	784.5

Натомість найнижчі показники виробітку спостерігаються у зимові місяці, зокрема у грудні (784,5 кВт·год) та січні (1 153,6 кВт·год), що відповідає зменшеним значенням загального горизонтального опромінення та значеннями опромінення на площину масиву, характерним для цього періоду. Незважаючи на цей сезонний спад, система зберігає стабільні річні показники ефективності: загальний річний вихід у мережу становить приблизно 23,38 МВт·год.

Симуляційний фреймворк та налаштування моделі

Сонячну PV-систему було змодельовано з використанням PyPSA, а оптимізацію виконано за допомогою багатоагентного DQN. PyPSA застосовано для моделювання енергосистеми, тоді як середовище OpenAI Gym використано для симуляції поведінки системи. Для оптимізації окремих компонентів застосовано DQN з кількома агентами, включаючи навантаження інвертора, частоту очищення та кут нахилу панелей.

Система була декомпозована на три спеціалізовані агенти:

- Агент А (Cleaning Agent) — мінімізує втрати від забруднення (soiling loss),
- Агент В (Tilt Agent) — оптимізує кут нахилу панелей для максимізації захоплення інсоляції,
- Агент С (Inverter Agent) — налаштовує параметри інвертора для досягнення максимальної ефективності перетворення.

Кожен агент спостерігає релевантні стани середовища та отримує індивідуально сформовану винагороду (shaped reward).

Деталізована архітектура моделі, яка представляє собою модульний фреймворк на основі навчання з підкріпленням для оптимізації продуктивності сонячних фотоелектричних (PV) систем, зображена на (рис. 1). Процес починається з використання зовнішніх джерел метеорологічних даних, зокрема наборів Typical Meteorological Year (TMY) від Meteonorm 7. Ці дані забезпечують критично важливі вхідні параметри, такі як інсоляція та температура. Отримані змінні довкілля надходять у симулятор PV-системи, змодельований у PyPSA (Python for Power System Analysis). Симулятор налаштований відповідно до характеристик системи: потужність на боці постійного струму (DC) — 30,2 кВт, потужність інвертора на боці змінного струму (AC) — 30,0 кВт, коефіцієнт продуктивності — 84,3%. Ця конфігурація формує базову основу для моделювання реалістичної поведінки PV-системи за різних умов довкілля.

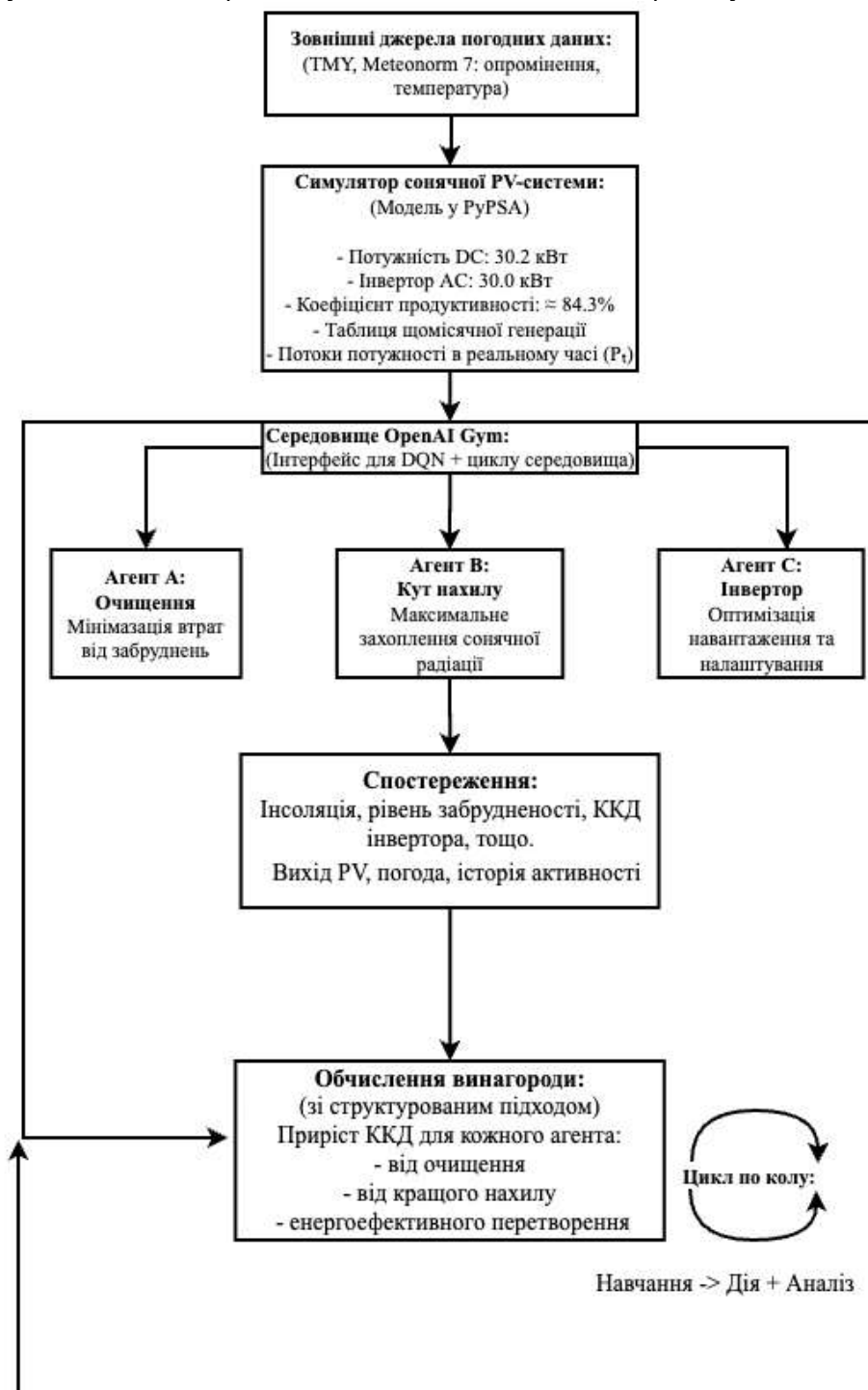


Рисунок 1 – Детальна блок-схема налаштування моделі

Вихідні дані симулятора інтегруються у середовище OpenAI Gym, яке виступає інтерфейсом для DQN-агентів, що взаємодіють із системою. Архітектура складається з трьох навчальних агентів, які отримують спостереження, зокрема інсоляцію, індекс забруднення, ефективність інвертора, метеорологічні дані та вихід PV-системи. Модуль обчислення винагороди формує індивідуальні ключові показники ефективності (KPI) для агентів на основі вигравів від очищення, оптимізації кута нахилу та ефективності перетворення. Цикл функціонує у режимі «навчання — дія — оцінювання», що дає змогу системі автономно підвищувати енергетичний вихід та експлуатаційну ефективність у часі.

Відгук системи енергопотоків розраховується за рівнянням (1):

$$s_t = [P_t, G_t, \emptyset_t, D_t, C_t] \quad (1)$$

де G_t — стан інвертора, що відображає робочий режим силових перетворювачів; $\emptyset_t$ — кут нахилу сонячних панелей; D_t — стан очищення; C_t — умови інсоляції.

Еволюція середовища описується функцією переходу за рівнянням (2):

$$s_{t+1} = f(s_t, a_t, w_t) \quad (2)$$

де a_t — дія агента або контролера в момент часу t , наприклад регулювання кута нахилу чи запуск процесу очищення; w_t — стохастична зміна погодних умов. Така формалізація дає змогу моделі відображати динамічні характеристики енергетичних систем і дозволяє багатоагентному підходу reinforcement learning (RL) оптимізувати виробіток енергії в режимі реального часу.

Кожен агент відповідає за контроль певного підкомпонента системи:

- Агент А — планування очищення;
- Агент В — оптимізація кута нахилу;
- Агент С — керування навантаженням інвертора.

Кожен агент отримує локальне спостереження із глобального стану системи, обирає дію та одержує індивідуальну винагороду.

Функція формування винагороди визначається рівнянням (3):

$$R_t = a_1 E_t - a_2 C_t - a_3 M_t \quad (3)$$

де E_t — енергія, подана в мережу у момент часу t ; C_t — витрати на очищення; M_t — штраф за технічне обслуговування; a_1, a_2, a_3 — вагові коефіцієнти, що збалансовують енергетичну ефективність та експлуатаційні витрати.

Спільна оптимізаційна функція формулюється рівнянням (4), де кожен агент навчається максимізувати сумарну винагороду:

$$\frac{\max}{\emptyset_t} E \sum_{t=0}^T \gamma^t R_t \quad (4)$$

де γ — коефіцієнт дисконтування.

Результати та аналіз

У цьому розділі представлено результати симуляційного моделювання, що демонструють ефективність запропонованого багатоагентного фреймворку для підвищення продуктивності сонячної PV-установки «River Park, facade». Поєднання моделювання системи на основі PyPSA з керуючими стратегіями, побудованими на reinforcement learning (RL), дало змогу оцінити вплив кооперативних агентів на ключові експлуатаційні показники.

Порівняння місячної генерації енергії (у кВт·год) між двома підходами: стандартним методом та оптимізованим методом на основі RL подано на (рис. 2). Столпчики із суцільною заливкою відображають вихід енергії в мережу за базовим сценарієм, тоді як суцільна лінія з маркерами демонструє результати RL-оптимізації.

В обох випадках простежується виразна сезонна динаміка: максимальні показники виробітку спостерігаються у період з березня по вересень, тоді як мінімальні значення характерні для періоду пізньої осені та зими (листопад, грудень, січень, лютий).

На графік накладено червону лінію з маркерами, яка відображає середній щомісячний виробіток енергії, досягнутий завдяки оптимізації на основі RL. Ця лінія стабільно розташована вище за вихідні столпчики, що свідчить про вищий рівень виробітку енергії RL-оптимізованої системи в кожному місяці. Числові значення над лінією відображають приріст продуктивності, який коливається від 50 до 100 кВт·год щомісяця. Стандартне відхилення результатів RL за кількома симуляціями позначене заштрихованою

областю, яка демонструє рівень невизначеності у продуктивності RL. Таким чином, RL-оптимізація не лише забезпечує стабільне підвищення виробітку енергії протягом року, але й гарантує керований рівень варіативності у критичні періоди енергоспоживання та генерації.

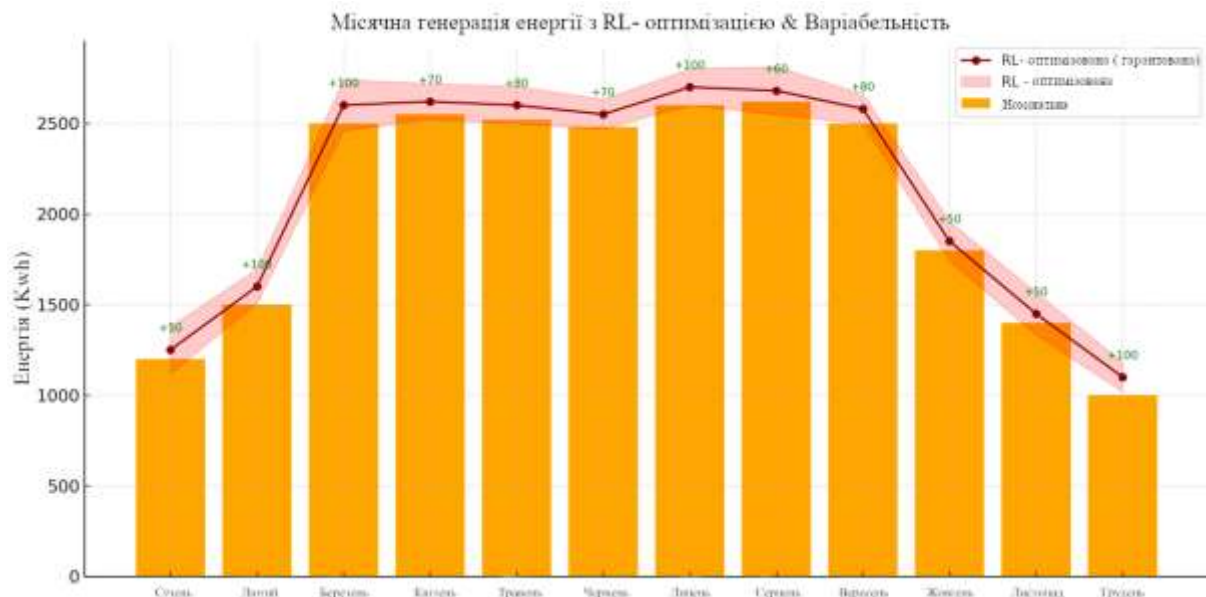


Рисунок 2 – Порівняння значень щомісячної генерації електроенергії в мережу між номінальною системою та RL-оптимізованою.

Щомісячний коефіцієнт продуктивності (Performance Ratio, PR) для двох підходів представлено на (рис. 3).

PR є нормалізованим показником, що характеризує ефективність перетворення доступної енергії у корисний електричний вихід. Найвищі значення PR (0,72–0,75) зафіксовано у січні та лютому, що свідчить про оптимальну роботу системи в ці місяці. Починаючи з жовтня, спостерігається різке зниження коефіцієнту продуктивності, з особливо вираженим падінням у листопаді та мінімальними значеннями в грудні (нижче 0,3 для обох версій системи), що, ймовірно, зумовлено зменшенням сонячної інсоляції або більш жорсткими експлуатаційними умовами.

У більшості місяців RL-оптимізований коефіцієнт продуктивності зберігає дещо вищі значення порівняно з оригінальним, що особливо помітно у квітні, травні, листопаді та грудні. Це підтверджує, що застосування reinforcement learning (RL) забезпечує більш ефективну роботу системи за умов змінної інсоляції. У період із березня по вересень обидві криві коефіцієнту продуктивності залишаються відносно стабільними (0,63–0,67) з мінімальними відмінностями, що свідчить про обмежені можливості для подальшої оптимізації в місяцях із вже високою ефективністю.

Поступове накопичення виробітку енергії протягом року для двох підходів — оригінального та RL-оптимізованого проілюстровано на (рис. 4). Обидва методи демонструють стабільно зростаючий тренд, що підтверджує безперервну генерацію енергії впродовж року. Водночас крива RL-оптимізованої системи постійно розташована вище за вихідну, що свідчить про вищу ефективність збору енергії.

Різниця між підходами стає особливо помітною з середини року, зокрема після червня, що вказує на здатність RL-підходу ефективно навчатися та адаптуватися до змін довкілля чи динаміки роботи системи у часі. До грудня RL-оптимізована система досягає дещо більш ніж 25 000 кВт·год. Ця кумулятивна перевага доводить, що навіть відносно невеликі щомісячні прирости, досягнуті завдяки reinforcement learning (RL) у підсумку накопичуються та забезпечують відчутне підвищення річного виробітку енергії.

Як показано на (рис. 5) - RL-оптимізована система забезпечує стабільно вищий рівень виробітку енергії, що підтверджується як вищим медіанним значенням, так і загальним зміщенням розподілу у бік більшої продуктивності. Діапазон варіацій у обох випадках залишається незначним, однак RL-оптимізована система демонструє дещо більшу дисперсію у межах вищого рівня продуктивності. Це свідчить про те, що оптимізація на основі reinforcement learning (RL) підвищує загальний вихід енергії в мережу.

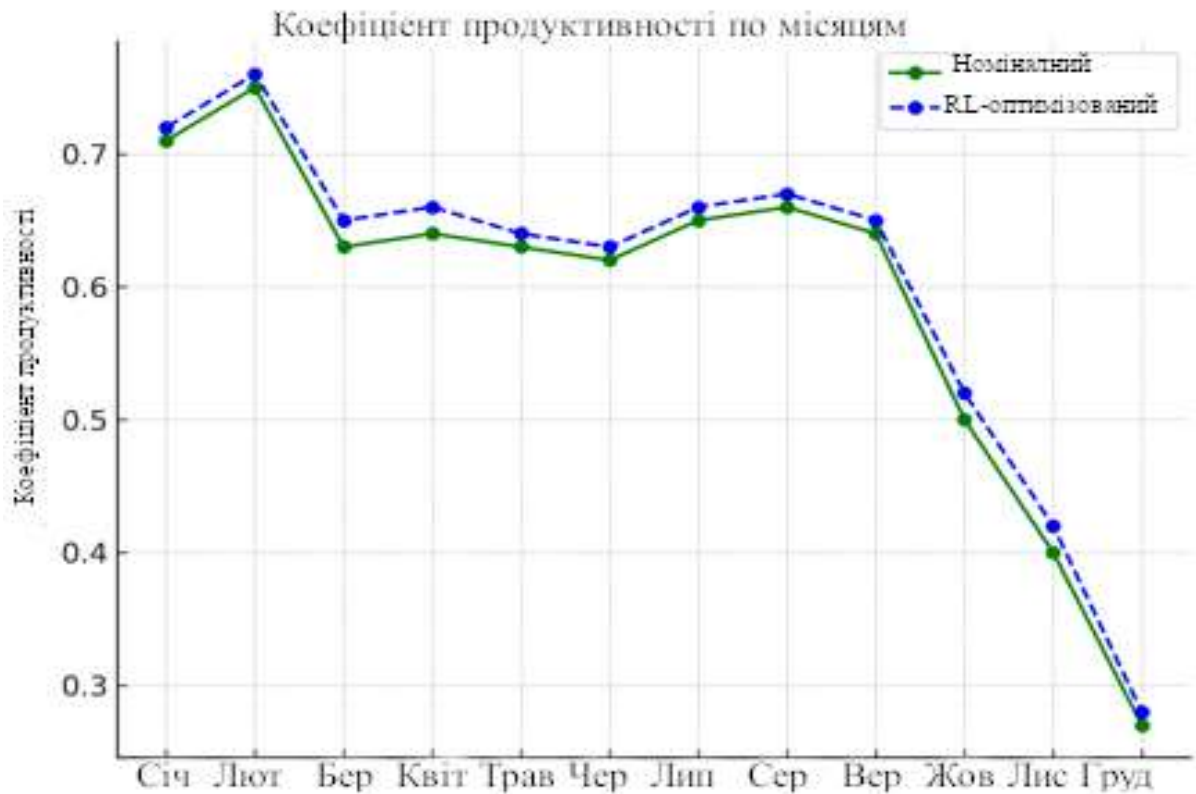


Рисунок 3 – Графік щомісячного коефіцієнта продуктивності (Performance Ratio) упродовж року.

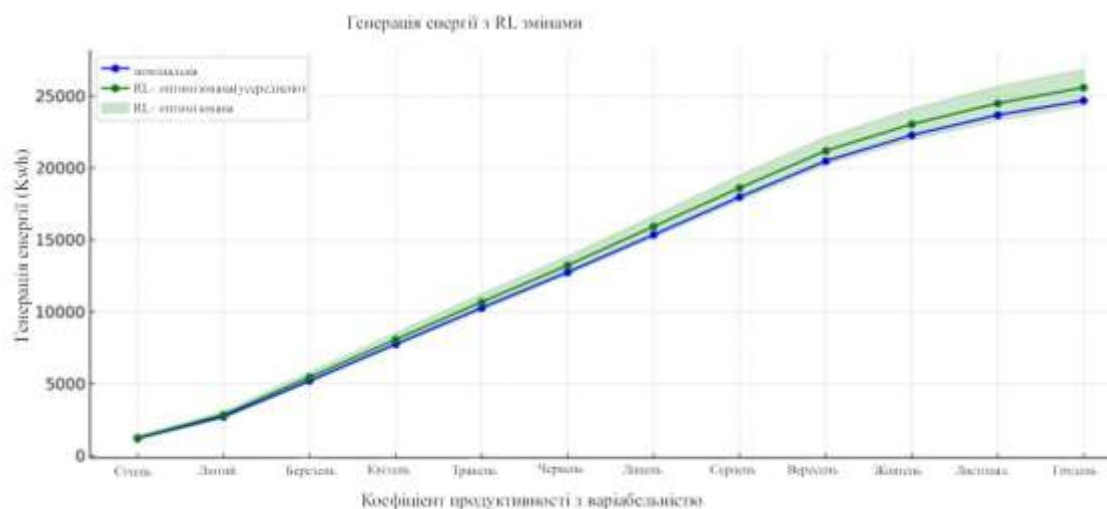


Рисунок 4 – Графік залежності накопиченої енергії від коефіцієнта продуктивності з урахуванням варіацій.

Висновки

Дослідження підтверджує ефективність використання reinforcement learning (RL) для оптимізації мережових енергетичних систем. У порівнянні з базовою стратегією, модель на основі RL стабільно забезпечує вищий місячний виробіток енергії, особливо у періоди низької генерації. Отримані результати свідчать, що RL-агент успішно адаптується до сезонних та експлуатаційних варіацій, підтримуючи ефективність роботи системи за умов коливань зовнішніх факторів.

Аналіз кумулятивного виробітку підтверджує довгострокові переваги RL-оптимізації. До кінця року RL-оптимізована система перевищує базову за сукупним енергетичним виходом. З технічної точки зору, результати дослідження підтверджують, що RL є масштабованим та адаптивним інструментом керування, який має значний потенціал для широкого впровадження у сфері інтеграції відновлюваних джерел енергії.

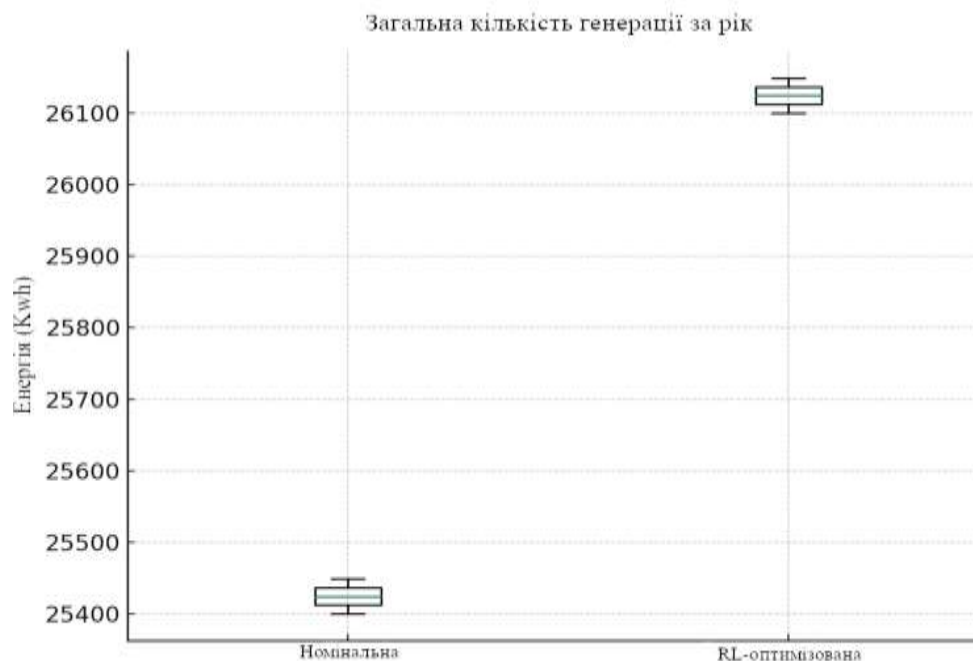


Рисунок 5 – Генерація енергії номінальної та у запропонованій RL-оптимізованій моделі.

Список використаної літератури

1. Iturralde Carrera L. A., Garcia-Barajas M. G., Constantino-Robles C. D., Álvarez-Alvarado J. M., Castillo-Alvarez Y., Rodríguez-Reséndiz J. Efficiency and Sustainability in Solar Photovoltaic Systems: A Review of Key Factors and Innovative Technologies. *Eng.* 2025. T. 6. Art. 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6030050>.
2. Endiz M. S., Gökkuş G., Coşgun A. E., Demir H. A Review of Traditional and Advanced MPPT Approaches for PV Systems Under Uniformly Insolation and Partially Shaded Conditions. *Appl. Sci.* 2025. T. 15. Art. 1031. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15031031>.
3. Tu R., Guo Z., Liu L., Wang S., Yang X. Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization. *Energies.* 2025. T. 18. Art. 2683. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112683>.
4. Mdallal A., Yasin A., Mahmoud M., Abdelkareem M. A., Alami A. H., Olabi A. G. A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts, innovations, and sustainability. *Sustainable Horizons.* 2025. T. 13. Art. 100137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>.
5. Abdelwahab S. A. M., Khairy H. E., Yousef H., et al. Comparative analysis of reinforcement learning and artificial neural networks for inverter control in improving the performance of grid-connected photovoltaic systems. *Scientific Reports.* 2025. T. 15. Art. 24477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09507-9>.
6. Kathe M. L., Makokha A. B., Zachary S. O., Adaramola M. S. A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies.* 2023. T. 16. Art. 2206. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052206>.
7. Wadehra A., Bhalla S., Jaiswal V., Rana K. P. S., Kumar V. A deep recurrent reinforcement learning approach for enhanced MPPT in PV systems. *Applied Soft Computing.* 2024. T. 162. Art. 111728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111728>.
8. Phan B. C., Lai Y.-C., Lin C. E. A Deep Reinforcement Learning-Based MPPT Control for PV Systems under Partial Shading Condition. *Sensors.* 2020. T. 20. Art. 3039. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113039>.
9. Kabir F., Yu N., Gao Y., Wang W. Deep reinforcement learning-based two-timescale Volt-VAR control with degradation-aware smart inverters in power distribution systems. *Applied Energy.* 2023. T. 335. Art. 120629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120629>.
10. Liu D., Zang C., Zeng P., Li W., Wang X., Liu Y., Xu S. Deep reinforcement learning for real-time economic energy management of microgrid system considering uncertainties. *Frontiers in Energy Research.* 2023. T. 11. Art. 1163053. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1163053>.
11. Ali M. H., Zakaria M., El-Tawab S. A comprehensive study of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *Sci Rep.* 2025. T. 15. Art. 14269. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96247-5>.

12. Jung S.-W., An Y.-Y., Suh B., Park Y., Kim J., Kim K.-I. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Scheduling of Energy Storage System in Microgrids. *Mathematics*. 2025. T. 13. Art. 1999. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13121999>.

13. Feng C., Liu A. L. Peer-to-peer energy trading of solar and energy storage: A networked multiagent reinforcement learning approach. *Applied Energy*. 2025. T. 383. Art. 125283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125283>.

B. Pashkevych¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0004-8598-1940

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4028-0185

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

OPTIMIZING FACADE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING REINFORCEMENT LEARNING

Optimizing solar photovoltaic systems in complex urban environments requires intelligent and adaptive control strategies to account for the dynamic operational factors. This study presents a data-driven simulation and optimization framework for the “River Park, Facade” solar Photovoltaic installation using PyPSA for system modeling and multi- agent Deep Q-Learning (DQN) for control optimization. The system under study features a 30. 2 kW DC-rated array and a 30 kW AC inverter, with a measured annual output of 23. 38 MWh. The performance ratio (PR) of 84.3% based on meteorological inputs from Meteonorm are used for the analysis. To enhance operational efficiency, we deployed a multi-agent reinforcement learning (MARL) framework that exploits three cooperative agents: a cleaning agent to mitigate soiling losses, a tilt agent to maximize irradiance capture, and an inverter agent to regulate conversion efficiency. Each agent was trained within a PyPSA– OpenAI Gym environment using shaped rewards aligned with specific loss categories. The MARL system was validated through comparative overlay plots of the original system versus the RL-optimized version. Results demonstrate an increased monthly grid output in nearly all months and a slight but consistent improvement in PR. Additionally, higher cumulative energy production throughout the year, and a notable gain in total annual energy yield was observed in case of RL-enhanced regime. These findings confirm the potential of modular, reward-shaped MARL for real-time optimization of facade-integrated solar Photovoltaics systems for smart building energy systems in urban settings.

Keywords: reinforcement learning, photovoltaic system optimization, multi-agent systems, deep Q-learning, solar energy, smart buildings, performance ratio, energy efficiency, real-time control, urban renewables.

Надійшла: 29.08.2025

Received: 29.08.2025

ЕКОЛОГІЯ

ECOLOGY

UDC 504.06

DOI 10.20535/1813-5420.4.2025.341355

T. Hrebeniuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-9287-2919

N. Remez¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-8505-0266

Y. Fedchenko¹, master student

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

APPLICATION OF MONITORING TO SUBSTANTIATE THE BIOOLOGICAL METHOD OF SOIL RESTORATION DUE TO MILITARY OPERATIONS

As a result of military operations involving the use of various types of weapons in Ukraine, there is a significant negative impact on the environment: from the impact on the behavior and migration of fauna, which entails significant changes in natural ecosystems, to the multifaceted abiotic impact on the air, water and soil environments through various types of pollution (mechanical, chemical, noise, thermal, vibration, etc.).

The article highlights the problem of soil contamination in Ukraine as a result of military operations and identifies key factors of anthropogenic impact on the environment.

It also considers the main compounds and substances that enter the soil environment during combat operations and their potential negative impact on human health through the food chain. The aim of the article is to monitor bio- and phytoremediation methods, which are potential ways of restoring soils to a safe condition for further use in agriculture. The article provides a selection of plant species relevant to Ukraine for the purpose of removing specific pollutants that have entered the soil during military operations.

Key words: military operations, soil contamination, war-caused pollutants, restoration of soil ecosystems, bioremediation, phytoremediation, environmental safety, safety of agricultural products.

Introduction. In the modern world, as a result of excessive anthropogenic impact on the natural environment, its safety can already be questioned. Pollutants of various nature and chemical composition enter the environment as a result of human activity in completely different ways, where they can subsequently migrate and transform into other compounds, sometimes causing even greater damage than the original substance. The main and most powerful sources of pollution are emissions into the atmosphere from various industries, industrial and domestic wastewater discharges into water bodies, and agriculture, which pollutes the environment, especially the soil, in various ways: from the burial of dead livestock to the uncontrolled excessive use of fertilizers, pesticides and fungicides, which in high concentrations have a toxic, sometimes lethal, effect on flora and fauna that were not initially targeted for elimination..

The above activities are aimed at meeting human needs and are important economic and social components. Stopping anthropogenic impact on the environment means a complete cessation of human activity, which is a priori impossible. The negative impact caused by humanity can be minimized as much as possible by approaching the problem comprehensively, using the latest technologies and changing people's worldview and values, which should be nature centric.

However, in today's world, there are many gaps in the functioning of states as systems, not all states have equal rights in the global geopolitical arena, as a result of which the population suffers from poverty, hunger and wars.

Wars and armed conflicts have a large number of devastating consequences for the natural environment. These include the destruction of biodiversity, mass migration of species, mechanical changes to landscapes and soil degradation, additional vibration loads that can affect geological activity depending on the area, and direct environmental pollution. Among the types of pollution, we can highlight emissions from the combustion of fuel (both diesel and rocket fuel) and emissions resulting from the explosion of shells (including carbon dioxide and carbon monoxide, sulfur dioxide, and nitrogen oxides) [1], mechanical pollution of water bodies and soil with the remains of military vehicles, equipment, shells, debris from destroyed infrastructure, and chemical pollution with the contents of shells, petroleum products and spills of potentially hazardous substances as a result of damage to, for example, enterprises where such substances may be used or stored.

Considering that 70% of the territory of Ukraine consists of agricultural land [2], the issue of monitoring the quality of soil and products grown on damaged areas becomes extremely important. There are no legal

requirements for mandatory monitoring of the quality of soil damaged by military action, but landowners should be responsible for the potential risks of contamination of agricultural products [3].

The greatest impact on agricultural land is in the frontline areas, as the density of explosive craters only increases over time due to regular shelling with various types of weapons of different calibers and chemical compositions [1]. Figures 1-6 show images of agricultural land attacked by various types of weapons. Soils throughout Ukraine are also suffering from long-range missile and drone strikes.

Purpose and task. The purpose of this article is to identify the most optimal methods for restoring soils damaged by military operations, in particular contamination by pollutants of various nature, in Ukraine, based on an analysis of scientific articles, reports by international organizations and international experience, using a comparative analysis of literature data.

Presentation of the main material research.

The main sources of heavy metals entering the soil during combat operations are damage to military equipment, the use of ammunition, fragments of shells, mines, aerial bombs, as well as combat waste generated by the destruction of infrastructure [4]. Some of the most dangerous metals are lead, copper, zinc, cadmium, nickel, chromium, and manganese [5]. The presence of heavy metals impairs the physical and chemical properties of the soil, reduces its fertility and inhibits the activity of soil microorganisms, which are key to maintaining the health of the ecosystem [4].

Excessive concentrations of heavy metals cause toxic effects on the development of vascular plants [6]. The content of heavy metals in agricultural soils can directly affect human health through the consumption of crops grown on contaminated soils [7].

In addition to heavy metals, petroleum product residues, which are constantly released into the environment during military operations, have a significant impact on the soil environment. The toxic effects of petroleum products on the human body can manifest themselves through the consumption of contaminated food grown in affected areas [8]. Petroleum products are represented by saturated and unsaturated hydrocarbons, aromatic hydrocarbons and resins. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which have carcinogenic and mutagenic properties, are particularly dangerous. Contamination with petroleum products has a significant impact on soil properties (water permeability, aeration capacity, mineral composition), which inhibits plant growth and development [9].

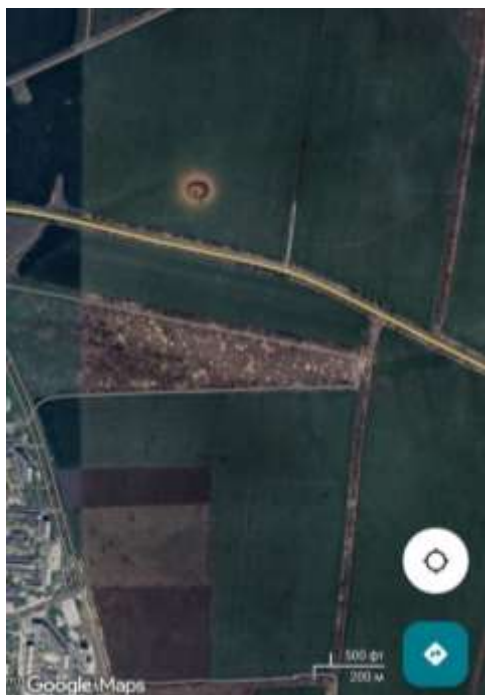


Figure 1 – Agricultural land near Mariupol, 47,1295758, 37,7001700

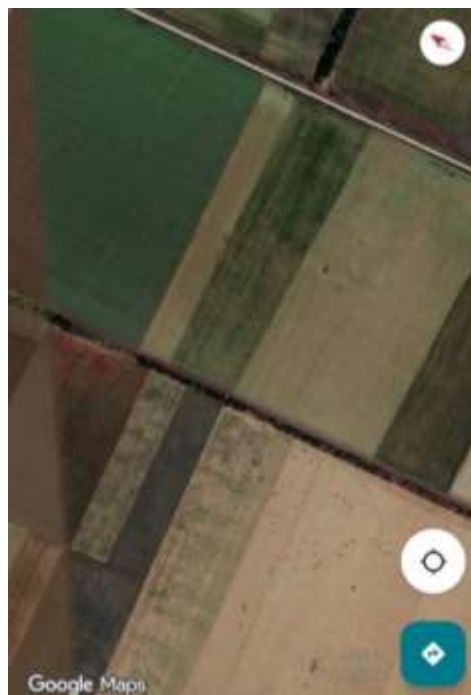


Figure 2 – Agricultural land near the village of Ternovi Pody, Mykolaiv region, 46,8523664, 32,3503878

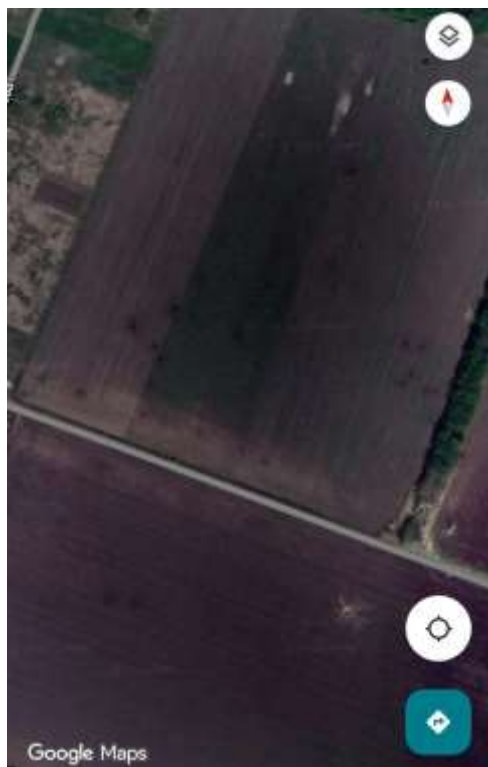


Figure 3 – Agricultural land near the village of Tsyrkuny, Kharkiv region, 50.080362,36.404144

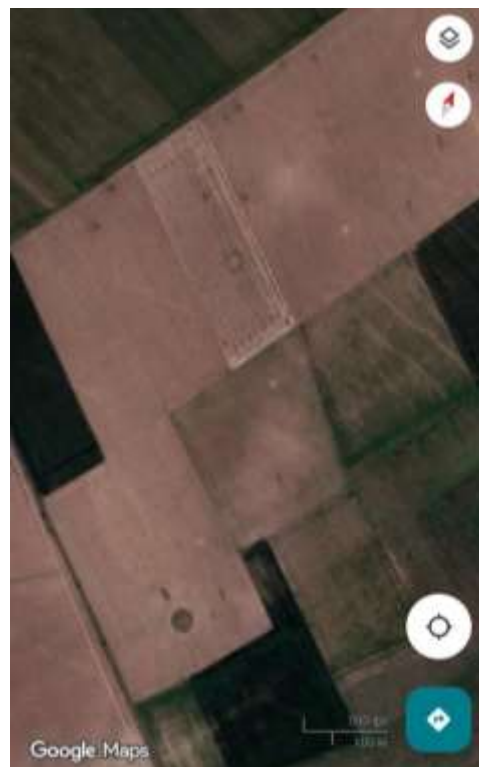


Figure 4 – Agricultural land near the village of Synetskyi, Donetsk region, 48.945392,38.419409

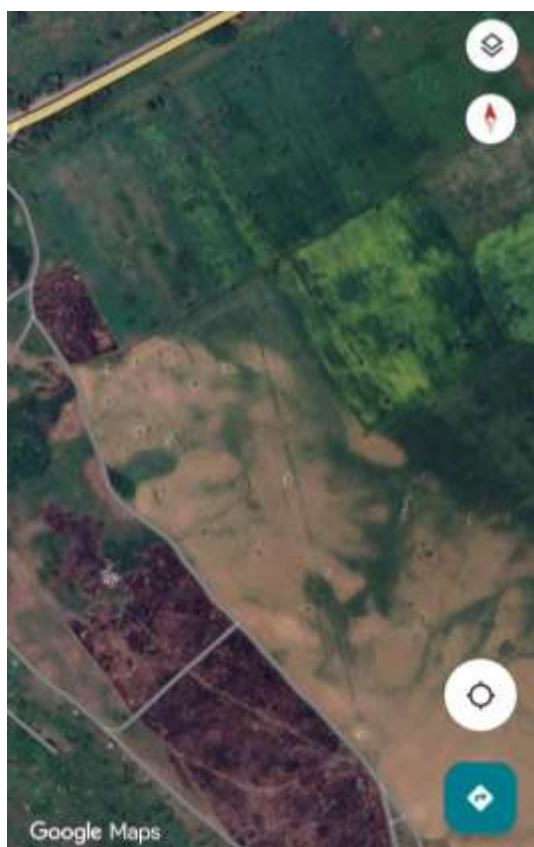


Figure 5 – Agricultural land near the village of Davydiv Brid, Kherson region, 47.250720,33.173254

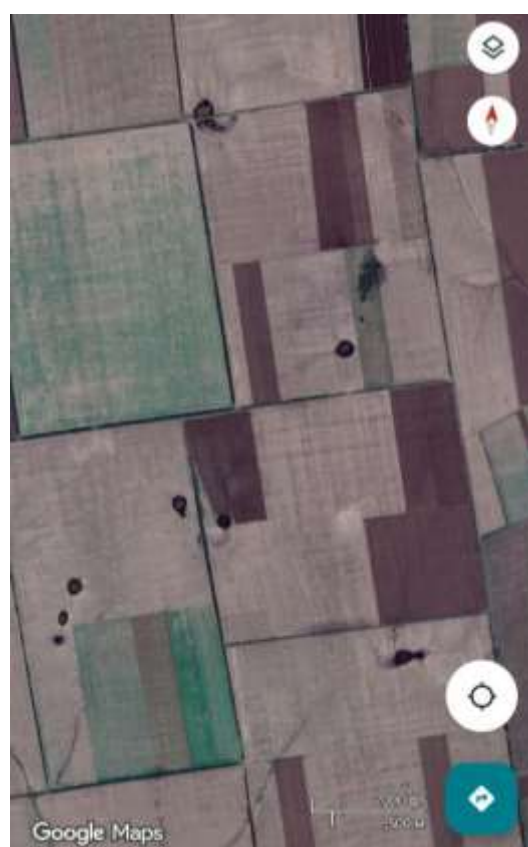


Figure 6 – Agricultural land near the village of Avidivka, Odessa region, 46.032858,30.186393

The activity of microorganisms is an essential component of healthy soil ecosystems. When a shell explodes, depending on the composition of the explosive, the temperature in the explosion cloud can vary from 2000 K to 4000 K [10]. At such temperatures, all organic matter that makes the soil fertile burns out, along with all microorganisms. The absence of microorganisms in the soil will potentially have a negative impact on the growth of plants used for phytoremediation. This issue requires additional research on the restoration of the soil microbiome to ensure favorable conditions for plant growth and the revival of the soil ecosystem.

One of the most promising methods of soil restoration in Ukraine is bioremediation. Biological restoration methods are environmentally friendly technologies for cleaning water, soil and even air from pollutants of various types and origins [11]. This approach involves the use of natural processes to remove various components from contaminated areas, which does not require significant financial costs.

Bioremediation involves the use of biological agents (mainly microorganisms: bacteria, fungi, algae) to decompose or remove unwanted components from the environment. The article 'Bioremediation an eco-friendly method for administration of environmental contaminants' [12] provides a comprehensive description of bioremediation techniques, including: bioaugmentation (the introduction of microorganisms to decompose pollutants), bioventing (the stimulation of aerobic microorganisms by pumping air), biosparging, biocomposting (mixing contaminated soil with organic waste to accelerate the decomposition of pesticides and petroleum products), and biopiles (aerated piles of contaminated soil). Biocomposting is the most promising and cost-effective method for soil remediation in Ukraine, especially due to the localized negative impact of events such as the explosion of a shell on a private plot of land used for agriculture

The above methods of bioremediation can be combined with phytoremediation, which in turn involves the use of plants and associated soil microorganisms to reduce the environmental impact of pollutants. The term phytoremediation itself comes from the Greek phyto – plant, remedium – to correct or remove evil [13].

The specific advantages of using phytoremediation as a method of soil restoration compared to traditional methods are increased biodiversity and fertility, and prevention of erosion [12], which are extremely important aspects, especially in the context of soil structure destruction and the extermination of microbial species diversity after an explosion.

In general, there are five main mechanisms for cleaning the environment of unwanted components [14]:

- phytoextraction - absorption of pollutants by roots and accumulation in the above-ground parts of plants (effective for metals);
- phytostabilisation is an immobilisation of pollutants in the soil through sorption, precipitation or complex formation in the inter-root space;
- phytodegradation is an enzymatic decomposition of certain organic compounds (herbicides, pesticides, petroleum products) into simpler ones with subsequent absorption by plants;
- rhizofiltration is a purification of water from metals by absorption by roots (effective for aquatic systems with low pollution);
- phytovolatilisation is a transformation of pollutants (such as mercury or arsenic) into volatile compounds and their removal through transpiration.

The table below shows the strengths and weaknesses of bio- and phytoremediation in the context of Ukraine.

Table 1 – Strengths and weaknesses of biological soil remediation methods

Method	Advantages	Disadvantages	Prospects for application
Bioremediation	Environmentally friendly, relatively inexpensive, can be used for organic contaminants	Significant duration of the process, need for monitoring	Restoration of small volumes of soil in local areas, including the private sector
Phytoremediation	Availability of plants, proven effectiveness, resistance to various types of pollutants	Significant duration, disposal of contaminated biomass, maintenance requirements, need for soil quality monitoring during the remediation process	Widespread use in agricultural areas

Species of plants used for phytoremediation.

Returning to issues relevant to Ukraine, namely the safety of agricultural soils, the most effective and economically acceptable mechanism would be classic phytoextraction. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the most researched species for this process. It has high potential for phytoremediation, which has been confirmed in studies on the remediation of soils contaminated with nickel, lead, chromium and cadmium [15].

Studies have shown that sunflowers accumulate a higher concentration in its leaves, accounting for 55% of the total metal content compared to the stems. Another effective species is brown mustard or Indian mustard (*Brassica juncea*), which shows high potential for decontaminating lead-polluted soils, especially when using adjuvants such as EDTA, which chelate heavy metals, making them more available for absorption by plants [16]. In addition to these species, hybrid poplar (*Populus*) and dandelion (*Taraxacum officinale*) can be used for the phytoextraction of heavy metals such as chromium [17].

Phytoremediation allows plants to be used for the degradation of hydrocarbons, particularly thanks to their well-developed root system, which creates a favourable environment for symbiotic microorganisms in the rhizosphere. The uptake and absorption of organic chemical compounds depend on their physicochemical properties, in particular on the logarithm of the octanol-water partition coefficient ($\log K_{ow}$). Chemicals with moderate hydrophobicity ($\log K_{ow}=1.0 - 3.5$) are the most bioavailable to root vascular plants. However, some hydrophilic compounds, such as methyl tert-butyl ether, can also be absorbed by plants through water flow. [18].

For phytoremediation of oil-contaminated soils, *Bassia scoparia* is effective due to its associated rhizosphere microorganisms [19]. Alfalfa (*Medicago sativa*) can also significantly reduce the concentration of petroleum products in the soil [20]. Some ornamental plants, such as tall fescue (*Festuca arundinacea*) and birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*), can be used to clean up oil-contaminated soils [21].

Hybrid poplar (*Populus*) can also be used to clean soil from explosives, in particular 2,4,6-trinitrotoluene (TNT), which is one of the main explosive components of most shells used to shell Ukrainian territory [22]. Studies have shown that poplars can absorb TNT from the soil, with most of the TNT being bound and transformed in the plant's root system. A summary table of plants for phytoremediation and corresponding pollutants is provided below.

Table 2 – Phytoremediation agents and pollutants against which they are effective

Plant	Type of pollutant	Features of use
<i>Helianthus annuus</i> (sunflower)	Lead, cadmium, chromium, nickel	High accumulative capacity in leaves and stems
<i>Brassica juncea</i> (Indian mustard)	Lead (using chelates, in particular EDTA)	High level of Pb removal thanks to chelation
<i>Populus spp.</i> (hybrid poplar)	Heavy metals (Cr, Zn), explosives (TNT)	Active transformation of explosives in the root system
<i>Taraxacum officinale</i> (dandelion)	Chromium and other heavy metals	High adaptability in different conditions
<i>Bassia scoparia</i> (common broom)	Petroleum products, surfactants	Symbiosis with microorganisms increases the degradation of carbohydrates
<i>Medicago sativa</i> (alfalfa)	Petroleum products	Reduces the concentration of hydrocarbons in the soil
<i>Festuca arundinacea</i> (reed grass)	Petroleum products	Used for decorative recultivation
<i>Lotus corniculatus</i> (birdsfoot trefoil)	Petroleum products	Suitable for long-term ecosystem restoration

Fig. 7 shows the efficiency of metal absorption by various hyperaccumulator plants, including Indian mustard (*Brassica juncea*), galvanophilic fern (*Pteris vittata*), poplar (*Populus spp.*), annual sunflower (*Helianthus annuus*), and alpine penny-cress (*Noccaea caerulea*, previously *Thlaspi caerulescens*), according to the article 'Exploring Phytoremediation And Plants As Natural Cleaners Of Polluted Environments' by Deborah Paripuranam et al., 2025 [11].

International experience in the use of phytoremediation.

In the field of heavy metals, phytostabilisation technology has been proven and is successfully used in both Europe and the United States [23]. For example, Belgium has conducted successful large-scale trials of zinc (Zn) and cadmium (Cd) immobilisation using additives and recultivation, while the US Environmental Protection Agency (EPA) has supported the use of biosludge for the recultivation of mining sites. A new direction is phytomining (extraction by plants) of valuable metals such as nickel, thallium and gold, where the main goal is cost-effective extraction, not just decontamination. However, the efficiency of phytoextraction of heavy metals, especially for meeting strict regulatory standards, remains low, as confirmed by studies in Denmark [24]. In a heavily contaminated site in Valby (Denmark) using willow (*Salix sp.*) and poplar (*Populus sp.*), the efficiency of Cd removal by willow was less than 0.5% over 10 years, and for other heavy metals, less than 1% over 10 years. Calculations have shown that it could take more than 178,360 years for poplar to meet the standards for nickel (Ni). Despite this, planting trees on contaminated sites is still recommended due to additional benefits: reduced leaching, CO₂ fixation and habitat creation [24].

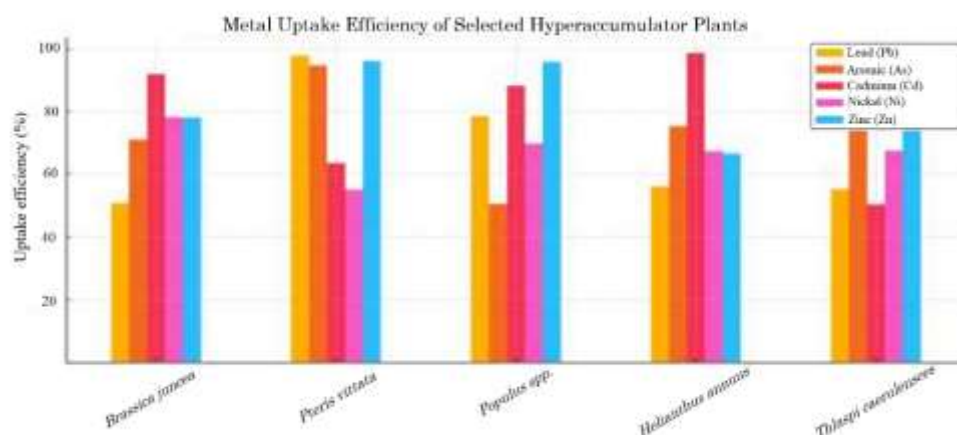


Figure 7 - Efficiency of metal uptake by plants

In Japan, *Thlaspi caerulescens* (Gang ecotype) has significant potential for phytoremediation of cadmium (Cd)-contaminated soils [25]. Compared to the slow extraction recorded in Denmark, studies on representative soils in Japan (fluvisol and andosol) have shown that only about 2 harvests for fluvisol and about 6 harvests for andosol may be needed to reduce the total Cd concentration by 50%. To increase the effectiveness of Cd phytoremediation in Japan, it is recommended to use short rotation (repeated harvesting and planting), as this increases the availability of Cd and uses new rhizosphere volume. Figure 8 shows the decreasing dependence of the total cadmium content in the soil on the number of harvests [25].

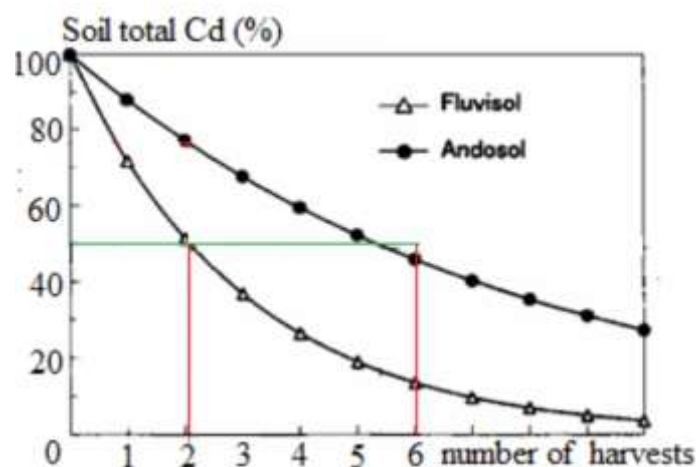


Figure 8 - Dynamics of reduction of total Cd depending on the number of harvests

In Italy (Treccate), following an oil well spill, agricultural crops such as maize (*Zea mays*) and sorghum (*Sorghum*) were significantly more effective in removing petroleum hydrocarbons than agronomic methods or natural attenuation [23]. In addition, pilot studies have shown that the remediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons (PHC) and trace elements (TE) using plants (*L. sativum*, *M. sativa*, *H. annuus*) and additional microorganisms and earthworms, demonstrated a reduction in PHC content by 80% and metals by 20% after 17 months [26].

The Baltic Phytoremediation concept, implemented as a cross-border project between Sweden, Poland and Lithuania, aims to use phytoextraction in combination with biomass generation and its subsequent use as an energy resource. Thus, after burning contaminated plant biomass, valuable ash can be recovered for further use. This approach increases energy efficiency and is an alternative energy source that reduces CO₂ emissions. Pilot cases for this project include reducing the level of nutrients (nitrogen and phosphorus) in landfill layers in Sweden, assessing the potential of energy crops to accumulate heavy metals (Zn, Cu, Cr, Pb, Ni and Cd) using sewage sludge as fertiliser in Lithuania, and phytoremediation of landfill leachate and soil remediation from heavy metals and organic pollutants (surfactants, dioxins, PCBs) in Poland [26].

With regard to radionuclides, although this area is less well documented, Phytotech conducted a field trial in the Chernobyl Nuclear Power Plant zone (Ukraine) using sunflowers on rafts to dramatically reduce ¹³⁷Cs levels in surface water within 4–8 weeks. In addition, laboratory studies in the United States have shown that

willow, *Kochia scoparia* and *Brassica napus* can remove 40–60% of 137Cs from soil under greenhouse conditions [23].

Management of post-phytoremediation biomass. After successful phytoremediation of the soil, a critically important task arises regarding the safe handling of the resulting biomass, which is contaminated with various compounds. Due to the presence of toxic pollutants, this biomass cannot be used as animal feed, compost or biofertiliser, as this would simply result in the transfer of pollutants within the environment, leading to repeated contamination and potential toxic effects on animals and plants. Therefore, the development and implementation of a sustainable strategy for managing this biomass is a key final stage in the entire process of soil restoration by phytoremediation.

According to Santanu Mukherjee's article 'Sustainable management of post-phytoremediation biomass' [27], this biomass is a 'green concentrate of pollutants' that requires careful planning for its disposal. One of the main classical approaches is thermal conversion, which includes incineration and pyrolysis. Incineration is a simple and effective way to reduce the volume of biomass and destroy organic pollutants. However, heavy metals will not disappear using this method, but will be concentrated in ash, which will require treatment and disposal. Pyrolysis allows the production of biochar, which in this case will still contain heavy metals, but this raw material can be used as a non-renewable filter in various technological processes due to its high adsorption capacity.

Chemical treatment methods can also be used to extract and stabilise contaminants. According to the study 'Sustainable management of post-phytoremediation biomass,' one of the most innovative areas is phyto-extraction, which involves the extraction of valuable metals from biomass. Chemical extraction of metals from biomass using acid solutions allows for the production of a concentrated solution from which metals can be recovered.

Conclusions

The article provides a comprehensive analysis of the problem of soil contamination in Ukraine as a result of military operations, in particular with heavy metals, petroleum products and explosives. The resulting soil degradation poses a threat to the environment and public health, as the bioaccumulation of certain pollutants and their toxic effects create a risk of contamination of agricultural products.

Based on literary sources and the experience of other countries, the effectiveness of bio- and phytoremediation is justified as the most promising and realistic method of soil restoration in Ukraine. Bioremediation, through the use of microorganisms, ensures the decomposition of organic pollutants and the restoration of the soil microbiome, while phytoremediation allows for the effective accumulation, transformation or immobilisation of heavy metals, hydrocarbons and explosives. Special attention should be paid to the use of hyperaccumulative plants such as common sunflower (*Helianthus annuus*), alfalfa (*Medicago sativa*) and Indian mustard (*Brassica juncea*), which are promising inexpensive options for restoring contaminated land. Poplars (*Populus spp.*) can also be used to prevent the spread of petroleum products in the environment and their toxic effects.

The results of the study prove that the use of bio- and phytoremediation methods is scientifically sound and practically feasible for the restoration of degraded soils in Ukraine. Based on the analysis, it is recommended to launch a national soil restoration program using these methods, integrating international experience and adapting it to Ukrainian realities.

References

1. Norenko K., Voytsikhovska A. Military conflict in Eastern Ukraine. – 2015. – P. 104–114.
2. Strategy for improving the management mechanism in the field of use and protection of state-owned agricultural lands and their disposal, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 07.06.2017 No. 413. – 2017.
3. Gulich M.P., Kharchenko O.O., Yemchenko N.L., Olshevska O.D., Lyubarska L.S. War in Ukraine: degradation and contamination of agricultural soils and their consequences // Hygiene of inhabited places. – 2024. – No. 74. – P. 49–55.
4. Zaitsev Yu.O., Hryshchenko O.M., Romanova S.A., Zaitseva I.O. The influence of hostilities on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrsky districts of Sumy region. // Bulletin of the Sumy National Agrarian University. Series: Agronomy and Biology. – 2022. – No. 3(52). – P. 26–30.
5. Gulich M.P., Kharchenko O.O., Yemchenko N.L., Olshevska O.D., Lyubarska L.S. War in Ukraine: the problem of heavy metal contamination of agricultural lands and products // Environment and Health. – 2024. – No. 4. – P. 38–42.
6. Kiran R., Bharti R., Sharm R. Effect of heavy metals: An overview // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 51. – P. 880–885. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278
7. Dubey S., Shri M., Gupta A., Rani V., Chakrabarty D. Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism // Environmental Chemistry Letters. – 2018. – Vol. 16. – P. 1169–1192.
8. Hu M. Environmental Behavior of Petroleum in Soil and its Harmfulness Analysis // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – Vol. 450(1). – 012100. – DOI: 10.1088/1755-1315/450/1/012100

9. Moubasher H.A., Hegazy A.K., Mohamed N.H., Moustafa Y.M., Kabieli H. Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2015. – Vol. 98. – P. 113–120.
10. Kuhl L., Bell J., Beckner V., Balakrishnan K. Spherical Combustion Clouds in Explosions. – 23rd ICDERS, UC-Irvine, CA, July 23–29, 2011.
11. Paripuram T.D., Chirumamilla V., Chahal K., Khan T.K.H., Dixit S., Rana B. Exploring Phytoremediation And Plants As Natural Cleaners Of Polluted Environments // *International Journal of Environmental Sciences*. – 2025. – Vol. 11, No. 10s. – URL: <https://theaspd.com/index.php>
12. Muttaleb W.H., Ali Z.H. Bioremediation: An eco-friendly method for administration of environmental contaminants // *International Journal of Applied Sciences and Technology*. – 2022. – Vol. 1(2). – P. 1–10.
13. Cunningham S.D., Ow D.W. Promises and prospects of phytoremediation // *Plant Physiology*. – 1996. – Vol. 110(3). – P. 715–719. – DOI: 10.1104/pp.110.3.715
14. Etim E.E. Phytoremediation and its mechanisms: A review // *International Journal of Environment and Bioenergy*. – 2012. – Vol. 2(3). – P. 120–136. – URL: <http://www.ModernScientificPress.com/Journals/IJEE.aspx>
15. Francis E. Phytoremediation Potentials of Sunflower Plants. – ResearchGate, 2025.
16. Chen D., Ibrahim M., Soroma M., Danjaji H.A., Jibo A.U., Yang Y. Season-based phytoremediation potential of brown mustard for lead decontamination: effect of EDTA chelation and antioxidant enzyme activity // *International Journal of Phytoremediation*. – 2025. – Vol. 27(10). – P. 1489–1501.
17. Maitry A., Patil G., Dubey P. Evaluating Phytoremediation Approaches for the Restoration of Degraded Ecosystems in India // *Nature Environment and Pollution Technology*. – 2025. – Vol. 24(2). – P. 84262.
18. Dietz A.C., Schnoor J.L. Advances in Phytoremediation // *Environmental Research*. – 2001. – Vol. 87(3). – P. 184–192.
19. Moubasher H.A., Hegazy A.K., Mohamed N.H., Moustafa Y.M., Kabieli H. Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2015. – Vol. 98. – P. 113–120.
20. Souza E.C., Vessoni-Penna T.C., Pinheiro R. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: an overview // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2014. – Vol. 89. – P. 88–94.
21. Liu R., Jadeja R.N., Zhou Q., Liu Z. Treatment and Remediation of Petroleum-Contaminated Soils Using Selective Ornamental Plants // *Environmental Engineering Science*. – 2012. – Vol. 29(6). – P. 548–553.
22. Thompson P.L., Ramer L.A., Schnoor J.L. Uptake and Transformation of TNT by Hybrid Poplar Trees // *Environmental Science & Technology*. – 1998. – Vol. 32(6). – P. 975–980.
23. Schwitzguébel J.-P., Van der Lelie D., Baker A., Glass D.J., Vangronsveld J. Phytoremediation: European and American trends—Successes, obstacles and needs // *Journal of Soils and Sediments*. – 2002. – Vol. 2(2). – P. 91–99. – DOI: 10.1065/jss2002.03.37
24. Algreen M., Trapp S., Rein A. Phytoscreening and phytoextraction of heavy metals at Danish polluted sites using willow and poplar trees // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21(14). – P. 8992–9001. – DOI: 10.1007/s11356-013-2085-z
25. Nishiyama Y., Yanai J., Kosaki T. Potential of *Thlaspi caerulescens* for cadmium phytoremediation: Comparison of two representative soil types in Japan under different planting frequencies // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2005. – Vol. 51(6). – P. 827–834. – DOI: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00117.x
26. Hogland W., Katrantsiotis C., Sachpazidou V. Baltic phytoremediation: Soil remediation with plants // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 578. – 012003. – DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012003
27. Mukherjee S., Leri A.C., Bandaranayaka C., Vázquez-Núñez E., Barros R., Khan A.H.A., Zhou P., Zhang T., Bernal M.P., Clemente R. Sustainable management of post-phytoremediation biomass // *Energy, Ecology and Environment*. – 2025. – DOI: 10.1007/s40974-025-00364-w

Т. В. Гребенюк¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-9287-2919

Н.С. Ремез¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8646-6527

Є. Федченко¹, магістрантка

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО МЕТОДУ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

Внаслідок ведення бойових дій із застосуванням різних видів зброї в Україні здійснюється значний негативний вплив на навколишнє середовище. Він проявляється у багатьох формах: від порушення поведінки та міграційних маршрутів представників фауни, що призводить до трансформації природних екосистем, до масштабного абіотичного впливу на повітряне, водне та ґрунтове середовище через різні види забруднення (механічне, хімічне, шумове, теплове, вібраційне тощо). Особливої уваги заслуговує проблема забруднення ґрунтів, оскільки вони виконують роль природного депо токсичних речовин, які здатні мігрувати харчовими ланцюгами й прямо впливати на здоров'я людей.

У статті висвітлено актуальну проблему деградації ґрунтового покриву України внаслідок військових дій та визначено ключові антропогенні чинники, що посилюють негативні екологічні наслідки. Детально розглянуто основні сполуки та речовини, які потрапляють у ґрунти під час бойових дій: залишки вибухових речовин, важкі метали, паливно-мастильні матеріали, сполуки азоту, хлору та інші політанти. Окремо акцентовано увагу на їх потенційному негативному впливі на біоту та на ризиках для здоров'я людей, які можуть виникати через накопичення цих токсикантів у продуктах харчування.

Метою дослідження є огляд сучасних методів біоремедіації та фіторемедіації, що розглядаються як перспективні технології для відновлення ґрунтів, приведення їх до екологічно безпечного стану та подальшого використання у сільському господарстві. У роботі наведено приклади застосування в Україні рослин-аккумуляторів і гіперакумуляторів, здатних видаляти специфічні політанти (важкі метали, нафтопродукти, залишки вибухових речовин), які потрапили у ґрунт під час війни.

Запропонований підхід спрямований на комплексне відновлення довкілля, збереження біорізноманіття та мінімізацію екологічних ризиків для населення. Результати дослідження можуть стати підґрунтям для формування державних програм з екологічної реабілітації територій, постраждалих від бойових дій, а також для подальших міждисциплінарних досліджень у сфері екотехнологій, сталого розвитку та післявоєнної відбудови країни.

Ключові слова: військові дії, забруднення ґрунтів, war-caused pollutants, відновлення ґрунтових екосистем, біоремедіація, фіторемедіація, безпека довкілля, безпека сільськогосподарської продукції.

Надійшла: 02.10.2025

Received: 02.10.2025