

ЗАЛІЗНЯК МАКСИМ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-7063-3351>e-mail: mzaliznyak2013@gmail.com**НЕТРЕБСЬКИЙ ВОЛОДИМИР**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2855-1253>e-mail: netrebskiy@ukr.net

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ: ГЛОБАЛЬНИЙ АНАЛІЗ НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ EPI ЗА 2024 РІК

У статті досліджено статистичний взаємозв'язок між рівнем середньорічного споживання електроенергії на душу населення та екологічною ефективністю країн світу, що оцінюється за Індексом екологічної ефективності EPI. Додатково проаналізовано потенційний вплив частки відновлюваних джерел енергії в національних енергобалансах як модифікуючого чинника. Вибірка охоплює 177 країн, для яких зібрано дані за 2024 рік із відкритих міжнародних джерел.

Застосовано методи описової статистики, кореляційного аналізу, а також побудовано логарифмічну регресійну модель для виявлення характеру залежності між змінними. Результати показали наявність помірної позитивної логарифмічної залежності між рівнем енергоспоживання та значенням EPI. Виявлено значну варіативність значень EPI серед країн з подібними рівнями енергоспоживання, що дозволило зробити припущення про роль якісних аспектів енергетичної політики.

У роботі проведено кластеризацію країн світу за показниками сумарного споживання електроенергії на душу населення у логарифмічному масштабі та індексу екологічної ефективності. Аналіз дозволив виокремити типові групи країн із подібним рівнем енергоспоживання та екологічної політики, виявити позицію України серед них, а також ідентифікувати еталонні кластери держав, які досягли високих екологічних показників за умов значного енергоспоживання. Результати кластеризації можуть використовуватись для формування типології енергетичних моделей та виявлення потенційно релевантних практик для екологічної трансформації енергетичного сектору України.

Ключові слова: енергоспоживання, екологічна ефективність, відновлювані джерела енергії, енергетична політика, екологічна стійкість, енергетичний перехід.

ZALIZNYAK MAKSYM, NETREBSKIY VOLODYMYR

Vinnytsia National Technical University

ENERGY CONSUMPTION AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE: A GLOBAL ANALYSIS BASED ON THE 2024 EPI INDEX

The article examines the statistical relationship between the average annual per capita electricity consumption and the environmental performance of countries worldwide, as assessed by the Environmental Performance Index (EPI). Additionally, the potential impact of the share of renewable energy sources in national energy balances is analyzed as a modifying factor. The dataset covers 177 countries, with 2024 data collected from open international sources.

Methods of descriptive statistics and correlation analysis were applied, along with the development of a logarithmic regression model to identify the nature of the relationship between the variables. The results revealed a moderate positive logarithmic dependence between energy consumption levels and EPI values, indicating a saturating effect: increases in per capita electricity consumption are associated with improvements in environmental performance only up to a certain threshold, after which the effect plateaus. At the same time, significant variability in EPI values among countries with similar consumption levels suggests the role of qualitative aspects of energy policy.

The study also includes a clustering of countries by logarithmically scaled per capita electricity consumption and EPI values. The analysis identified typical groups of countries with similar energy consumption and environmental policy profiles, determined Ukraine's position among them, and highlighted benchmark clusters of states that have achieved high environmental performance under conditions of substantial energy consumption. The clustering results can be used to develop typologies of energy models and to identify potentially relevant practices for the ecological transformation of Ukraine's energy sector.

Keywords: energy consumption, environmental performance, renewable energy sources, energy policy, environmental sustainability, energy transition.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 28.06.2025

Вступ

В сучасних умовах глобальної трансформації енергетичного сектору надзвичайно актуальним постає питання збалансування потреб економічного розвитку з екологічною безпекою. Середньорічне споживання електроенергії на душу населення (Total electricity demand per capita, TED per capita), яке широко застосовується як індикатор економічної активності та технологічного розвитку, дедалі частіше розглядається також у контексті його екологічних наслідків [1]. Зростання споживання електроенергії тісно пов'язане з розвитком електроенергетичної системи, яка має забезпечувати стабільне, безперебійне та надійне енергопостачання в умовах зростаючих соціально-економічних потреб. Це охоплює як розширення генерувальних потужностей, зокрема на основі відновлюваних джерел енергії, так і модернізацію електричних мереж, впровадження SMART-технологій та розвиток цифрової інфраструктури [2].

У цьому контексті показник енергоспоживання виступає не лише показником рівня енергетичних потреб населення й економіки, а й опосередкованим індикатором структурної спроможності країни

забезпечити сталий енергетичний розвиток. Високі значення цього показника, як правило, корелюють з рівнем індустріалізації, масштабами цифровізації та розвитком транспортної й комунальної інфраструктури.

Водночас важливо враховувати не лише обсяг споживаної електроенергії, а й екологічні наслідки, що супроводжують забезпечення такого рівня енергоспоживання. Зростання енергоспоживання за відсутності ефективної екологічної політики та належного контролю за впливом на довкілля, може призводити до посилення негативних екологічних тенденцій, зокрема збільшення викидів парникових газів, забруднення навколишнього середовища та деградації природних екосистем.

У відповідь на ці виклики країни світу активізують кліматичну політику, шляхом підтримки глобальних та регіональних ініціатив. Наприклад, Паризька угода 2015 року [3] встановлює глобальні цілі зі стримування підвищення середньої температури планети та передбачає індивідуальні зобов'язання країн щодо скорочення викидів і підтримки кліматичної стабільності.

Аналогічно, Європейський зелений курс (European Green Deal) [4] є стратегією Європейського Союзу, спрямованою на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року шляхом трансформації енергетичного сектора, скорочення викидів парникових газів та збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичному балансі.

Частка ВДЕ, у свою чергу, є не лише техніко-економічним показником, але й маркером екологічної модернізації, що дозволяє знижувати залежність від викопного палива та мінімізувати вплив на довкілля [5].

З метою оцінки ефективності екологічної політики держав, а також виявлення системних взаємозв'язків між рівнем енергоспоживання та станом довкілля, застосовуються численні аналітичні інструменти. Одним із найбільш авторитетних є Індекс екологічної ефективності (Environmental Performance Index, EPI), який інтегрує широкий спектр даних щодо забруднення повітря, управління ресурсами, зміни клімату, біорізноманіття та інших екологічних параметрів. На відміну від окремих екологічних показників, EPI надає можливість системно оцінювати успішність реалізації екологічної політики на міждержавному рівні [6].

Попри це, взаємозв'язок між рівнем енергоспоживання, часткою ВДЕ та екологічною ефективністю досі залишається недостатньо дослідженим, особливо у глобальному порівняльному контексті. З одного боку, високий рівень енергоспоживання може бути результатом розвиненої економіки, яка водночас інвестує в екологічні ініціативи. У той же час, високий рівень споживання може свідчити про нераціональну структуру енергетичної системи, що спричиняє підвищене екологічне навантаження.

В зв'язку з цим постає науково-практична проблема: яким чином пов'язані між собою обсяги споживання електроенергії, частка ВДЕ в загальному енергобалансі та показники екологічної ефективності, зокрема індекс EPI, у міжнародному порівнянні. Її розв'язання дозволить глибше зрозуміти сучасні енергетико-екологічні тренди, а також визначити умови, за яких економічне зростання не суперечить екологічній стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останній час проведено ряд досліджень, що стосуються встановлення взаємозв'язку між технічними, економічними та екологічними характеристиками, а також їх впливу на сталий розвиток країн. Ці роботи охоплюють різноманітні аспекти, зокрема аналіз ролі відновлюваних джерел енергії, застосування методів статистичної обробки енергетичних даних, а також розвиток сучасних підходів до оцінки екологічних індикаторів, які відображають ефективність енергетичних та екологічних політик.

Yumei Hou з групою науковців оцінили енергоефективність та екологічну ефективність країн Південної Азії в 2019 році, використовуючи методику аналізу граничної ефективності даних (DEA) [7]. В дослідженні використано комплексний набір індикаторів, що включає більш ніж 10 індексів і коефіцієнтів, для розробки унікального індексу енергоефективності і екологічності.

Mirza Muhammad Naseer та колеги у своєму дослідженні [8] вивчають вплив споживання електроенергії, якості управління та економічного зростання на екологічну стійкість у країнах з різним рівнем розвитку протягом 2001–2021 років. Індекс екологічної ефективності (EPI) та Цілі сталого розвитку (SDGs) використовуються як міри екологічної стійкості.

Дослідження I. Pigo та R. Duffey стосуються встановлення взаємозв'язку між індексом розвитку людства (HDI) та споживанням електроенергії на одну особу у 2019 році [9].

Elvis D. Achuo, Clovis Wendji Miamo, Tii N. Nchofoung проаналізували вплив споживання відновлюваної та невідновлюваної енергії на екологічну стійкість у 173 країнах світу за період з 1996 по 2020 рік [10]. Використовуючи модель регресії з фіксованими ефектами та робастними стандартними помилками, автори виявили, що споживання відновлюваної енергії позитивно впливає на екологічну ефективність, знижуючи викиди парникових газів.

Weizheng Kong пропонує метод аналізу структури споживання енергії в різних регіонах за допомогою алгоритму k-means [11]. Результати показують, що цей метод ефективно класифікує регіони за їхніми економічними та екологічними характеристиками.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є з'ясування характеру взаємозв'язку між середньорічним споживанням електроенергії на одну особу (TED per capita), Індексом екологічної ефективності (EPI) та часткою ВДЕ в енергобалансі в міжнародному порівнянні. Зокрема, в дослідженні визначається, чи є високий рівень

енергоспоживання обов'язковим чинником зростання екологічного навантаження та чи його вплив може бути пом'якшено завдяки використанню відновлюваних джерел енергії і впровадженню сучасних технологій.

Окрему увагу приділено виявленню країн з ефективними моделями енергоспоживання, які забезпечують розвиток без деградації довкілля, а також пошуку країн із подібною до України енергетично-екологічною динамікою для виявлення можливих напрямів національного енергетичного переходу.

Методика дослідження

Методологічну основу дослідження становить системний і міждисциплінарний підхід до аналізу взаємозв'язку між показниками функціонування електроенергетичних систем та індикатором екологічної ефективності в глобальному вимірі. Дослідження ґрунтується на ідеї, що рівень енергоспоживання, як один із ключових параметрів соціально-економічного та технологічного розвитку країни, може позитивно впливати на екологічну ситуацію або створювати додаткове навантаження на довкілля. У дослідженні також проаналізовано частку енергогенерації з ВДЕ в енергетичному балансі як можливий модифікуючий чинник, що посилює або пом'якшує вплив рівня енергоспоживання на екологічну ефективність.

Об'єктом дослідження є сукупність міждержавних показників енергоспоживання та екологічної ефективності, що характеризують функціонування енергетичних систем у контексті сталого розвитку. Зокрема, аналіз охоплює середньорічне споживання електроенергії на одну особу, Індекс екологічної ефективності (EPI) та частку відновлюваної енергетики в структурі національного енергобалансу.

Предметом дослідження є статистичний взаємозв'язок між сукупним попитом на електроенергію в розрахунку на одну особу (TED per capita) та індексом екологічної ефективності (EPI), а також вплив частки відновлюваних джерел енергії на характер цього зв'язку.

В рамках дослідження перевіряються кілька аналітичних гіпотез:

- наявність статистично значущої залежності між енергоспоживанням та екологічною ефективністю;
- роль частки ВДЕ як модифікуючого фактора, що здатен змінювати характер виявленої залежності;
- можливість існування груп країн із подібним рівнем енергоспоживання, але суттєво відмінними показниками EPI, що може свідчити про різні моделі енергетичної політики.

Методи дослідження, які використано в роботі: методи описової статистики для попередньої обробки даних та виявлення загальних тенденцій, метод кореляційного аналізу для оцінки сили та напрямку зв'язку між енергоспоживанням і EPI (коефіцієнт Пірсона, коефіцієнт детермінації, t-розподіл з обчисленням р-значення, кореляційна матриця).

В ході дослідження була розроблена нелінійна регресійна модель з логарифмічною апроксимацією, яка забезпечує адекватне відображення виявленої залежності між рівнем енергоспоживання та індексом екологічної ефективності. Візуалізація даних та статистичні розрахунки здійснювалися в хмарному табличному процесорі Google Sheets із використанням вбудованих функцій статистичного аналізу.

В рамках дослідження кластеризацію країн було здійснено з використанням методу k-means++, що забезпечує покращену ініціалізацію центрів кластерів і підвищену стійкість результатів. Реалізація алгоритму здійснювалася з використанням мови програмування Python та бібліотеки scikit-learn, яка надає інструменти для машинного навчання і кластерного аналізу. Додатково, для перевірки та візуалізації результатів застосовано засоби автоматичної кластеризації в програмному середовищі Microsoft Power BI, що дало змогу провести графічну інтерпретацію розподілу об'єктів між кластерами та здійснити порівняння результатів різними методами.

Результати дослідження

У дослідженні використано статистичні показники з відкритих джерел, які оприлюднені міжнародними організаціями. Зокрема, значення Індексу екологічної ефективності (EPI) за 2024 рік отримано за матеріалами Yale Center for Environmental Law & Policy [1], а показники середньорічного енергоспоживання на душу населення та частки відновлюваних джерел енергії — на основі статистичної інформації, оприлюдненої та платформою Our World in Data [5].

Вхідні дані для кореляційно-регресійного аналізу, що охоплюють 177 країн світу, були зведені у єдиний масив даних. Для кожної країни враховувалися показники середньорічного споживання електроенергії на одну особу (TED per capita) у 2024 році, індекс екологічної ефективності (EPI) за той самий рік, частка відновлюваних джерел енергії у загальному виробництві електроенергії.

Для аналізу взаємозв'язку між середньорічним споживанням електроенергії на душу населення, індексом екологічної ефективності та часткою ВДЕ у загальному обсязі виробництва електроенергії використано коефіцієнт кореляції Пірсона, застосований до вибірки з 177 країн, яка є репрезентативною для сукупності країн світу і який визначається за виразом:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

де: x_i — значення змінної X для i -ї країни;

y_i — значення змінної Y для i -ї країни;

$\bar{x}, \bar{y}$ — середні значення відповідних змінних;

n — кількість спостережень (177 країн).

В таблиці 1 наведена кореляційна матриця досліджуваних параметрів за 2024 рік з розрахованими коефіцієнтами кореляції. Проте, попередній візуальний аналіз діаграми розсіювання між середньорічним

енергоспоживанням на одну особу та індексом ЕРІ показав наявність нелінійного зв'язку із тенденцією до логарифмічного насичення. Тому в таблицю включено також логарифмічно трансформоване сумарне споживання електроенергії, що дозволило наблизити взаємозв'язок до лінійного вигляду.

Таблиця 1

Кореляційна матриця досліджуваних параметрів за 2024 рік

	Сумарне споживання електроенергії в 2024 році, кВт·год на 1 особу	Натуральний логарифм сумарного споживання електроенергії в 2024 році, кВт·год на 1 особу	Індекс ЕРІ, бали	Частка ВДЕ у структурі енергобалансу, %
Сумарне споживання електроенергії в 2024 році, кВт·год на 1 особу	X	-	0,459	0,028
Натуральний логарифм сумарного споживання електроенергії в 2024 році, кВт·год на 1 особу	-	X	0,625	-0,062
Індекс ЕРІ, бали			X	0,100
Частка ВДЕ у структурі енергобалансу, %				X

При аналізі кореляційної матриці виявлено дуже слабкий негативний зв'язок між споживанням електроенергії та часткою відновлюваних джерел енергії (–0,062), а також слабкий позитивний зв'язок між індексом ЕРІ та часткою ВДЕ (0,100).

Передбачалося, що показник “частка ВДЕ” може модифікувати зв'язок між рівнем енергоспоживання та індексом екологічної ефективності (ЕРІ), зменшуючи негативний екологічний вплив у разі високого споживання. Адже висока частка відновлюваної енергії в енергобалансі країни потенційно дозволяє знизити екологічні ризики навіть при високому енергоспоживанні.

Однак за результатами кореляційного аналізу така модераційна роль не підтвердилася: зв'язки цього показника з іншими змінними виявились слабкими ($r = 0,028$ з енергоспоживанням; $r = -0,062$ з енергоспоживанням в логарифмічному вираженні; $r = 0,100$ з ЕРІ), що вказує на відсутність значущої статистичної залежності між ними у межах досліджуваної вибірки. У той же час, виявлено помірну позитивну кореляцію між індексом екологічної ефективності (ЕРІ) та логарифмічним сумарним споживанням електроенергії на одну особу, що виражається коефіцієнтом Пірсона $r=0,625$. Це може свідчити про те, що країни з вищим рівнем енергоспоживання зазвичай мають кращі екологічні показники, хоча зв'язок не є однозначно сильним.

Щоб перевірити, чи отриманий коефіцієнт кореляції ($r = 0,625$) є статистично значущим, для відповідних наборів даних було виконано двовибірковий t-тест з нерівними дисперсіями і з двостороннім розподілом та обчислено відповідне р-значення. Отримане р-значення виявилось надзвичайно малим ($p < 0,000001$), що вказує на практично нульову ймовірність того, що спостережувана кореляція між змінними є результатом випадковості.

Таким чином, нульову гіпотезу про відсутність кореляції між індексом екологічної ефективності (ЕРІ) та логарифмічним сумарним споживанням електроенергії на одну особу у 2024 році можна відкинути з високим ступенем впевненості та зробити висновок, що виявлена кореляція є статистично значущою і підтверджує наявність реального взаємозв'язку між досліджуваними змінними.

Для оцінки якості побудованої регресійної моделі було розраховано коефіцієнт детермінації R^2 , який становив 0,390. Це свідчить про те, що приблизно 39,0 % варіації значень індексу екологічної ефективності (ЕРІ) може бути статистично пояснено змінами рівня середньорічного енергоспоживання на душу населення. Решта дисперсії обумовлена впливом інших факторів, не врахованих у межах побудованої однофакторної моделі.

З огляду на результати проведеного аналізу, для побудови моделі залежності між екологічною ефективністю (ЕРІ) та енергоспоживанням на душу населення була застосована логарифмічна регресійна модель:

$$ERI = a \cdot \ln(TED \text{ per capita}) + b \quad (2)$$

Параметри моделі a і b визначені методом найменших квадратів з використанням функцій лінійної регресії табличного процесора Google Sheets: нахил регресійної прямої $a=4,57$, вільний член $b=13,01$.

На рисунку 1 представлено діаграму розсіювання, що відображає взаємозв'язок між індексом екологічної ефективності (ЕРІ) та сумарним споживанням електроенергії на одну особу у 2024 році, поданим у логарифмічній формі. На діаграмі також зображено побудовану логарифмічну регресійну модель:

$$EPI = 4,57 \cdot \ln(TED \text{ per capita}) + 13,01 \quad (3)$$

Для виявлення типових моделей співвідношення енергоспоживання та екологічної ефективності було виконано кластеризацію із застосуванням методу k-means++, який забезпечує більш ефективну ініціалізацію центрів кластерів та підвищує стабільність отриманих результатів.

Реалізація алгоритму здійснювалася з використанням мови програмування Python та бібліотеки Scikit-learn, яка надає інструменти для створення та тренування різноманітних алгоритмів класифікації, регресії та кластеризації.

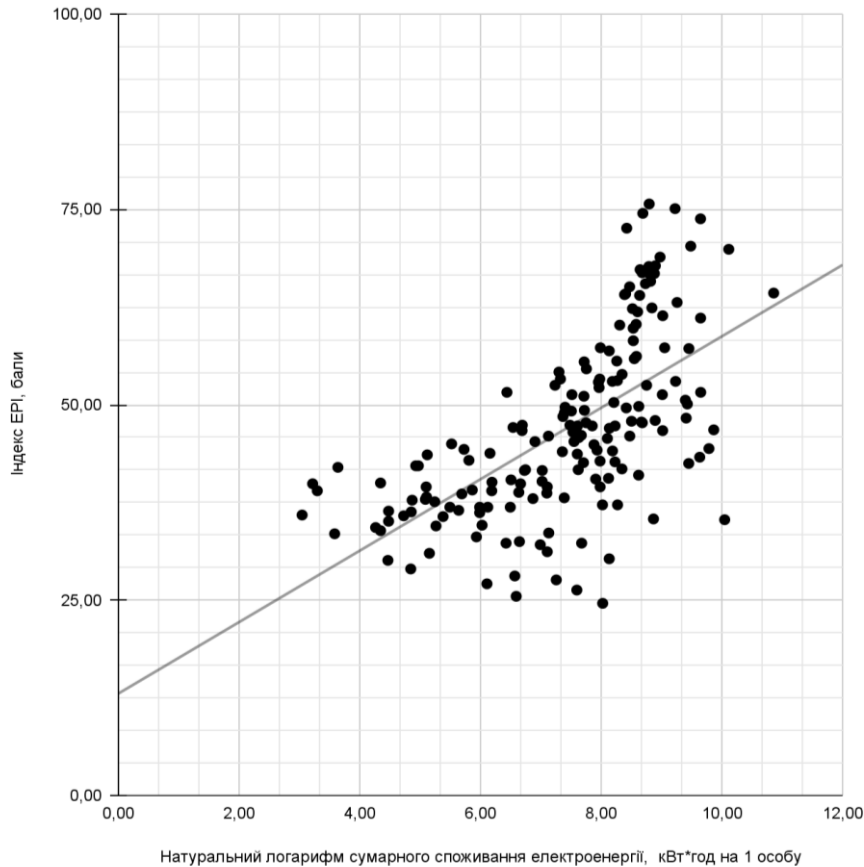


Рис.1. Діаграма розсіювання взаємозв'язку між індексом екологічної ефективності (EPI) та логарифмом споживання електроенергії на душу населення у 2024 році та логарифмічна регресійна модель

На основі методу ліктя (Elbow method) та силуетного коефіцієнту (Silhouette score) було обчислено метрики для вибору кількості кластерів. На рисунку 2 та на рисунку 3 представлені результати обчислень у вигляді графіків, які відображають динаміку інерції в методі ліктя та середнього силуетного коефіцієнта залежно від кількості кластерів.

За результатами аналізу методу ліктя видно, що різке зменшення інерції спостерігається до значення $k = 4$, після чого зниження стає поступовим, що свідчить про злам кривої. Це означає, що після 4 кластерів додаткове розбиття дає лише помірне покращення якості кластеризації. Разом з тим, значення інерції для $k = 5$ і $k = 6$ продовжують зменшуватись, що вказує на допустимість більш детальної сегментації даних.

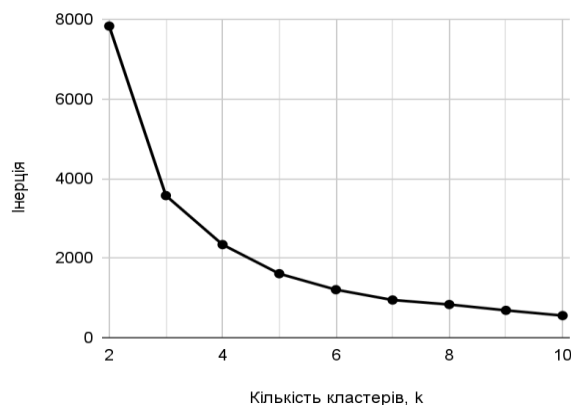


Рис.2. Обчислена метрика для вибору кількості кластерів методом ліктя

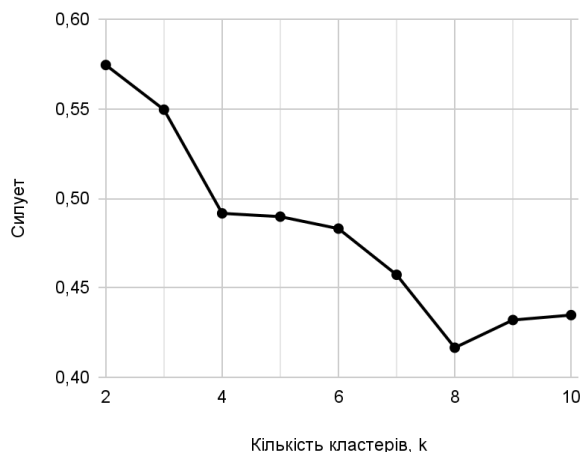


Рис.3. Обчислена метрика для вибору кількості кластерів методом силуетного коефіцієнту

З іншого боку, аналіз силуетного коефіцієнта демонструє, що найвища чіткість кластерів досягається при $k = 2$ (коефіцієнт 0.574), тоді як для $k = 4$ спостерігається помірне зменшення силуету (коефіцієнт 0.483), що свідчить про знижену чіткість меж між групами. Для $k = 5$ і $k = 6$ значення коефіцієнта залишаються майже на рівні $k=4$.

Отже, з урахуванням дослідницьких цілей, де важливо отримати більше 2 груп, але при цьому зберегти збалансованість між точністю та чіткістю кластеризації, вибір кількості кластерів $k = 6$ є доцільним компромісом. Це дозволяє досягти достатньої деталізації без істотного зниження якості розподілу.

На рисунку 4 представлено результат кластеризації, виконаної методом K-means++ із застосуванням мови програмування Python та бібліотеки Scikit-learn.

Для перевірки та наочної візуалізації результатів також було використано засоби автоматичної кластеризації в середовищі Microsoft Power BI. Отриманий розподіл об'єктів за кластерами майже повністю збігся з результатами, отриманими в середовищі Python, що підтверджує узгодженість класифікації.

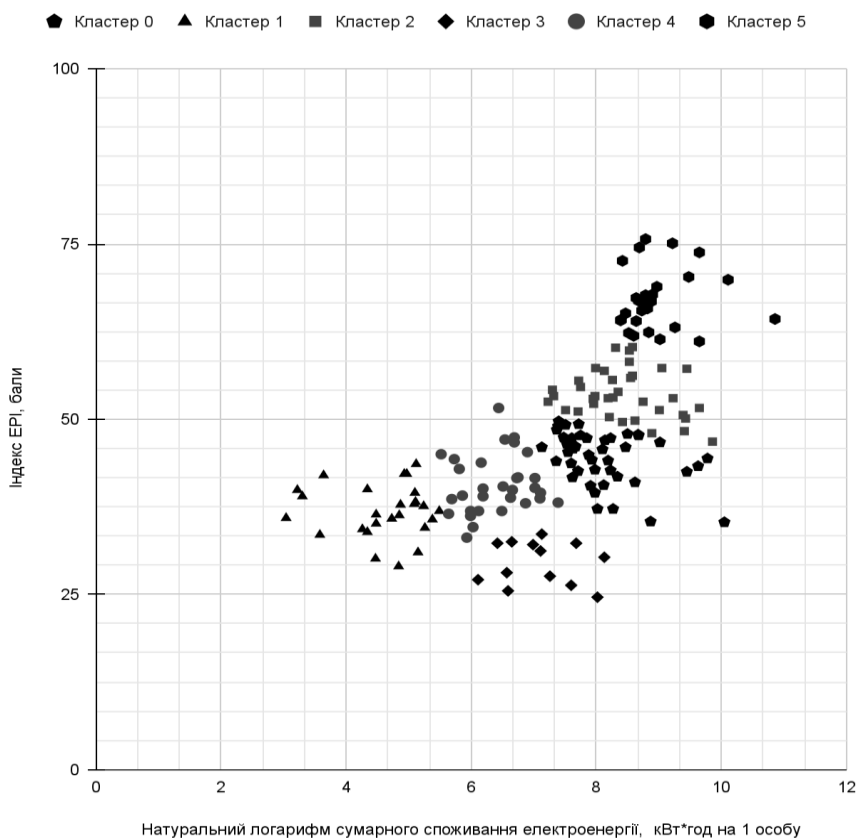


Рис.4. Візуалізація результатів кластеризації країн методом K-means++

Проведений кластерний аналіз показав, що за показниками сумарного споживання електроенергії на душу населення та індексу екологічної ефективності Україна потрапила до кластера країн із середніми екологічними стандартами та значним енергоспоживанням (Кластер 2). Цей кластер охоплює

високорозвинені держави з розвинутою інфраструктурою (наприклад, Італія, Сінгапур, США), країни з надвисоким енергоспоживанням на базі дешевих викопних ресурсів (Катар, ОАЕ, Бруней) та країни з перехідною економікою (Румунія, Сербія, Угорщина, Латвія), що дає змогу здійснити порівняльний аналіз і виявити релевантні практики для адаптації в українських умовах. Типовими характеристиками цих країн є енергоспоживання в межах 7,2–9,9 логарифмічних кВт·год на особу та середній рівень EPI в межах 46–60 балів, що свідчить про помірну ефективність екологічної політики в умовах індустріалізованої або сервісно-орієнтованої економіки.

З огляду на отримані результати доцільно продовжити дослідження досвіду країн, що впроваджують передові підходи до екологічної трансформації енергетичного сектору. Особливо актуальними для України можуть стати ініціативи Італії щодо програм термомодернізації будівель, політика Угорщини щодо обмеження використання пластику та стимулювання електротранспорту, впровадження урядом Румунії фінансових механізмів підтримки сонячних систем для домогосподарств [12, 13, 14]. Варто також відмітити Латвію, яка демонструє ефективне використання біомаси у виробництві теплової енергії та Нову Зеландію, яка вирізняється високою часткою відновлюваних джерел та чіткими законодавчими зобов'язаннями щодо вуглецевої нейтральності [15, 16]. В той самий час, екологічні підходи країн з надвисоким енергоспоживанням на базі дешевих викопних ресурсів, малих острівних держав або високорозвинених економік зі специфічною структурою потребують обережної інтерпретації та не можуть бути безпосередньо застосованими в українському контексті. Отже, подальші дослідження мають бути зосереджені на аналізі екологічної політики саме тих країн, що демонструють ефективність за подібних умов, із метою розробки адаптованих стратегій сталого розвитку енергетичного сектору України.

Кластерний аналіз також виявив окрему групу країн з вищими значеннями індексу екологічної ефективності, до якої належать переважно держави Західної, Північної та Центральної Європи, а також Канада, Японія та Австралія (Кластер 5). Попри схожий або навіть вищий рівень енергоспоживання на душу населення (8,4–10,9 логарифмічні кВт·год/особу), ці країни демонструють значно кращі екологічні результати (EPI у межах 61–75 балів), що свідчить про ефективність їхньої екологічної політики, впровадження зелених технологій і зрілих управлінських практик. Включення України до іншого кластера з нижчими екологічними показниками вказує на існування суттєвих викликів у сфері екологічного менеджменту, зокрема у сфері поводження з відходами, контролю за викидами, розвитку ВДЕ та енергоефективності будівель.

Цей високоефективний кластер може розглядатися як еталонна група, на яку варто орієнтуватися при формуванні національної стратегії сталого розвитку. Особливої уваги заслуговує досвід Данії у сфері вітрової енергетики та термомодернізації будівель, Німеччини в частині законодавчої підтримки відновлюваної енергетики й залучення громад до енергетичних кооперативів, Франції у напрямку розвитку електротранспорту та водневих технологій, а також Скандинавських країн у забезпеченні високого рівня переробки відходів і реалізації просвітницьких екологічних програм [17, 18, 19]. Естонія, в свою чергу, пропонує успішний приклад цифровізації екологічного моніторингу [20].

Перехід до екологічно ефективної моделі в Україні потребує не лише технологічної модернізації, а й комплексного посилення екологічного законодавства, інституційної спроможності та свідомої участі громадськості в процесах сталого розвитку. Саме такі країни можуть виступати бенчмарками для розробки середньо- та довгострокової стратегії екологічної трансформації України.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У межах дослідження було сформульовано та перевірено низку аналітичних гіпотез, зокрема щодо існування статистично значущої залежності між середньорічним споживанням електроенергії на душу населення та індексом екологічної ефективності EPI, а також ролі відновлюваної енергетики як чинника, що може змінювати характер такої залежності. Для виявлення тенденцій і закономірностей використано методи описової статистики, кореляційного аналізу та регресійного моделювання. Візуалізація залежностей і виконання статистичних обчислень здійснювалися за допомогою хмарного табличного сервісу Google Sheets із використанням вбудованих інструментів статистичного аналізу.

У процесі дослідження було розроблено нелінійну регресійну модель із логарифмічною апроксимацією, яка дозволила адекватно відобразити встановлений зв'язок між рівнем енергоспоживання на душу населення та індексом екологічної ефективності (EPI). Коефіцієнт детермінації, який було обчислено для оцінки якості побудованої регресійної моделі, свідчить про середній рівень пояснювальної здатності. З огляду на характер глобального аналізу та обмеження одновимірної моделі, такий результат можна вважати задовільним і аналітично значущим.

Отримані дані підтверджують наявність помірної залежності між споживанням електроенергії та екологічною ефективністю у нижньому та середньому діапазоні значень. Водночас для країн із високим рівнем енергоспоживання така закономірність не є лінійною: спостерігається розкид значень EPI, який зумовлений низкою супутніх чинників, серед яких можна виділити: особливості економіки та політики, обмеженість екологічного регулювання, низьку частку відновлюваних джерел у генерації та відсутність стратегій сталого розвитку. Це також свідчить про ефект "насичення", коли підвищення енергоспоживання не впливає на покращення екологічної ситуації, а визначальну роль починають відігравати якісні характеристики енергетичної політики та управлінських рішень.

Варто відзначити, що отримані результати не підтвердили гіпотезу щодо модераційної ролі показника "частка відновлюваних джерел енергії", який може впливати на залежність між енергоспоживанням та екологічною ефективністю. Відповідно, збільшення частки відновлюваних джерел енергії не гарантує автоматичного зростання екологічної ефективності. Крім того, на екологічну ситуацію продовжують впливати інші джерела забруднення, такі як транспорт, промисловість чи аграрний сектор. У разі відсутності комплексної екологічної політики та належного контролю за забрудненням водних ресурсів і ґрунтів, сам перехід на ВДЕ не зможе суттєво покращити загальний стан довкілля.

Наступним етапом дослідження може стати розширення підходів до аналізу впливу ВДЕ, зокрема провести дослідження не лише поточної частки, а й динаміки її зміни - приросту за попередній рік або за триваліший період, що дозволить оцінити дійсний ефект впливу відновлюваної енергетики на екологічні показники. Для підвищення точності розробленої математичної моделі також доцільно розглянути додаткові фактори, які можуть впливати на рівень екологічної ефективності країн при високому енергоспоживанні, наприклад: показники якості екологічного регулювання, індекси інноваційності, структури промисловості, урбанізації, рівня доходів населення та соціальної політики.

В рамках дослідження також проведено кластерний аналіз із використанням методу k-means++ для виокремлення груп країн з подібними профілями енергоспоживання та екологічної ефективності. Кластерний аналіз показав, що Україна належить до групи країн із середніми показниками екологічної ефективності та відносно високим рівнем енергоспоживання, поряд із такими державами, як Італія, Угорщина, Румунія та Латвія. Це відкриває можливості для порівняння політик і запозичення ефективних практик, зокрема в галузях термомодернізації, стимулювання ВДЕ, електротранспорту та поводження з відходами. Водночас інший кластер, до якого належать більшість країн ЄС, Канада, Японія та Австралія, демонструє вищі значення ЕРІ за схожого або навіть вищого енергоспоживання. Це свідчить про доцільність орієнтації на політики цих країн як зразкових прикладів екологічного управління. Для України важливо адаптувати їхній досвід, акцентуючи на розвитку зеленої енергетики, енергоефективності, цифровому моніторингу та залученні громад до процесів екологічної трансформації.

Перспективним напрямком подальших досліджень є формування типології країн за поєднанням рівнів енергоспоживання та екологічної ефективності. Такий підхід дозволить виокремити ефективні, ресурсно затратні, економічно-збалансовані моделі розвитку, а також групу країн із характеристиками, подібними до України. Поглиблений аналіз цих типів сприятиме виявленню причин екологічної "аномальності" окремих держав і формуванню обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення національної екологічної політики.

Таким чином, отримані результати підкреслюють необхідність урахування не лише кількісних, а й структурно-якісних характеристик енергетичного розвитку, що має стати підґрунтям для формування цілісної стратегії енергетичного переходу України відповідно до принципів сталого розвитку.

Література

1. Ritchie H., Rosado P., Roser M. Per capita electricity demand. *Our World in Data*. URL: <https://archive.ourworldindata.org/20250624-125417/grapher/per-capita-electricity-demand.html> (дата звернення: 14.07.2025).
2. Лежнюк П. Д. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж: монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. В. Сікорська. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 195 с.
3. Historic paris agreement on climate change: 195 nations set path to keep temperature rise well below 2 degrees celsius. *UN Climate Change*. URL: <https://unfccc.int/news/finale-cop21> (дата звернення: 14.07.2025)
4. Communication from the commission. The european green deal. *An official website of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640> (дата звернення: 14.07.2025).
5. Ritchie H., Roser M., Rosado P. Renewable energy. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/renewable-energy> (дата звернення: 23.07.2025).
6. Block, S., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A. Environmental performance index. *Environmental Performance Index*. URL: <https://epi.yale.edu> (дата звернення: 14.07.2025).
7. Measuring energy efficiency and environmental performance: a case of South Ssia / Y. Hou та ін. *Processes*. 2019. Т. 7, № 6. С. 325. URL: <https://doi.org/10.3390/pr7060325> (дата звернення: 14.07.2025).
8. Sustainable development goals and environmental performance: exploring the contribution of governance, energy, and growth / M. M. Naseer та ін. *Research in international business and finance*. 2024. С. 102646. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102646> (дата звернення: 10.08.2025).
9. Current status of electricity generation in the world and future of nuclear power industry / I. Pioro та ін. *Managing Global Warming*. 2019. С. 67-114. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00003-X> <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102646> (дата звернення: 05.08.2025).
10. Achuo E. D., Miamo C. W., Nchofoung T. N. Energy consumption and environmental sustainability: what lessons for posterity?. *Energy reports*. 2022. Т. 8. С. 12491–12502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.033> (дата звернення: 14.08.2025).

11. Analysis of energy consumption structure based on K-means clustering algorithm / W. Kong та ін. *E3S Web of conferences*. 2021. Т. 267. С. 01054. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126701054> (дата звернення: 12.08.2025).
12. Building Bonuses in Italy: what's new in the 2025 Budget Law. *Arletti Partners*. URL: <https://arlettipartners.com/building-bonuses-in-italy-whats-new-in-the-2025-budget-law> (дата звернення: 01.08.2025).
13. Hungary bans single use plastic products. *CMS Law-Now*. URL: <https://cms-lawnow.com/en/ealerts/2021/06/hungary-bans-single-use-plastic-products/> (дата звернення: 01.08.2025).
14. Romania grants EUR 64 million for municipal solar power projects. *Balkan Green Energy News*. URL: <https://balkangreenenergynews.com/romania-grants-eur-64-million-for-municipal-solar-power-projects/> (дата звернення: 14.08.2025).
15. Energy infrastructure in Latvia - Interreg Baltic Sea Region. *Interreg Baltic Sea Region*. URL: <https://interreg-baltic.eu/project-posts/energy-equilibrium/energy-infrastructure-in-latvia/> (дата звернення: 04.08.2025).
16. New Zealand to reduce availability of emission credits from 2025. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/business/environment/new-zealand-reduce-availability-emission-credits-2025-2024-08-19/> (дата звернення: 04.08.2025).
17. Terra N. Top 4 wind energy projects in Denmark. *International Recruitment & Employer of Record for Technology & Energy*. URL: <https://www.airswift.com/blog/wind-energy-projects-denmark> (дата звернення: 12.08.2025).
18. Germany proposes law to speed up geothermal and clean heat expansion. *Reuters*. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/germany-proposes-law-speed-up-geothermal-clean-heat-expansion-2025-07-04/> (дата звернення: 04.08.2025).
19. France backs hydrogen vans in €9 billion national strategy reboot. *Driving Hydrogen*. URL: <https://drivinghydrogen.com/2025/04/17/france-backs-hydrogen-vans-in-e9-billion-national-strategy-reboot/> (дата звернення: 10.08.2025).
20. The environmental data platform launched by Estonia will help countries fight the climate crisis. *Ministry of Climate Republic of Estonia*. URL: <https://kliimaministeerium.ee/en/news/environmental-data-platform-launched-estonia-will-help-countries-fight-climate-crisis> (дата звернення: 08.08.2025).