

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА**

**Навчально-науковий інститут
Інститут інформаційних технологій в економіці**

Кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики

Освітньо-професійна програма «Економічна кібернетика»

Галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Спеціальність 051 «Економіка»

Форма здобуття освіти: очна (денна)

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему **«Моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу за
показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності економіки»**

здобувача Тасенка Дениса Віталійовича

Науковий керівник: доктор економічних наук,

професор Андрій МАТВІЙЧУК

**Робота допущена до захисту перед екзаменаційною комісією
з атестації здобувачів вищої освіти (ЕК)**

Завідувач кафедри: кандидат фізико-математичних наук,

професор Галина ВЕЛИКОІВАНЕНКО

Київ – 2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА**

Інститут інформаційних технологій в економіці

Кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики

Освітньо-професійна програма «Економічна кібернетика»

Галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Спеціальність 051 «Економіка»

ПОГОДЖЕНО

Керівник проектної групи (гарант)
освітньо-професійної програми
Ольга ПРИТОМАНОВА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри штучного інтелекту,
моделювання та статистики
Галина ВЕЛИКОІВАНЕНКО

(підпис)

2026 р.

(підпис)

2026 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

здобувача вищої освіти Тасенка Дениса Віталійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

очної (денної) **форми здобуття освіти**
очної (денної), заочної, дистанційної

на підготовку кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему

«Моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу за
показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності економіки»

Тему затверджено наказом ректора Університету від «16 » березня 2026 р. № 417 ст

Кваліфікаційна бакалаврська робота виконується на матеріалах
бази даних World Bank (<https://data.worldbank.org/>), а також інших відкритих
міжнародних статистичних джерел.

План кваліфікаційної бакалаврської роботи

Розділ 1	Теоретичні основи енергетичного розвитку країн та екологізації економіки
Розділ 2	Інформаційне забезпечення та обґрунтування методології дослідження енергетичного розвитку країн світу
Розділ 3	Моделювання енергетичного розвитку країн світу та формування політик впровадження відновлюваної енергетики

Об'єкт дослідження:	процеси формування та трансформації структури енергоспоживання країн світу в умовах переходу до сталого розвитку.
Предмет дослідження:	методи аналізу та математичного моделювання структури енергоспоживання, енергоефективності та рівня розвитку відновлюваної енергетики.
Мета виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи:	дослідження енергетичного розвитку країн світу на основі показників структури енергоспоживання, вуглецевої інтенсивності економіки й екологічних характеристик та підготовка цільових рекомендацій з формування політики впровадження відновлюваної енергетики.

Конкретні завдання, які здобувач повинен виконати для досягнення поставленої мети:

У розділі 1: 1) розкрити сутність енергетичного розвитку та його роль в економіці країни; 2) охарактеризувати структуру енергоспоживання та її основні складові; 3) проаналізувати поняття вуглецевої інтенсивності та екологізації економічного розвитку; 4) здійснити огляд сучасних наукових підходів до аналізу енергетичних систем.

У розділі 2: 1) обґрунтувати систему показників дослідження та сформувати базу даних; 2) провести попередню обробку та стандартизацію даних; 3) здійснити кореляційний аналіз показників; 4) обґрунтувати використання методів кластерного аналізу.

У розділі 3: 1) провести кластеризацію країн світу за обраними показниками; 2) здійснити візуалізацію результатів дослідження; 3) проаналізувати отримані групи країн; 4) провести порівняльний аналіз кластерів за ключовими показниками; 5) визначити основні закономірності енергетичного розвитку країн світу; 6) сформулювати набір рекомендацій з формування політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів.

Завдання підготував
науковий керівник

(підпис)

Андрій МАТВІЙЧУК
(ім'я, прізвище)

Завдання одержав
здобувач

(підпис)

Денис ТАСЕНКО
(ім'я, прізвище)

Реферат

Кваліфікаційна бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та переліку використаних джерел, що містить 49 найменувань на 6 сторінках та 1 додатка на 11 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 95 сторінок друкованого тексту, з яких 78 сторінок основної частини. Робота містить 9 рисунків та 11 таблиць.

«Моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу за показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності економіки»

Об'єктом дослідження є процеси формування та трансформації енергетичного розвитку країн світу в умовах переходу до екологічно орієнтованої економіки.

Предметом дослідження є показники енергоспоживання, розвитку відновлюваної енергетики та вуглецевої інтенсивності економіки країн світу, а також методи їх аналізу, моделювання та кластеризації.

Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є аналіз і моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу на основі показників енергоспоживання, структури виробництва електроенергії та вуглецевої інтенсивності економіки, а також формування рекомендацій щодо політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів.

Відповідно до поставленої мети визначені такі завдання:

- розкрити теоретичні основи енергетичного розвитку та екологізації економіки;
- охарактеризувати сутність вуглецевої інтенсивності та роль відновлюваної енергетики;
- обґрунтувати систему показників і сформувати інформаційну базу дослідження;
- виконати попередню обробку, стандартизацію даних і кореляційний аналіз;
- застосувати методи K-means, BIRCH, DBSCAN та карти Кохонена для моделювання енергетичного розвитку країн світу;
- визначити групи країн зі схожими енергетичними профілями та сформувати рекомендації для різних кластерів.

Теоретична, методична та практична значущість отриманих результатів. У роботі узагальнено підходи до аналізу енергетичного розвитку, відновлюваної енергетики, вуглецевої інтенсивності та декарбонізації економіки. Обґрунтовано систему з 18 показників, що характеризують економічні, енергетичні, структурні та екологічні особливості країн світу. Проведено стандартизацію даних, кореляційний аналіз і порівняння методів кластеризації за основними метриками якості. Здійснено групування країн світу за подібністю їхніх енергетичних профілів. За результатами порівняння найкращим визначено метод K-means із поділом на 8 кластерів. Метод BIRCH показав якісний результат при 4 кластерах, тоді як DBSCAN виявився менш придатним через значну частку шумових спостережень.

Практичні результати дослідження полягають у побудові карт Кохонена, що дозволили виділити країни з розвиненою низьковуглецевою енергетикою, перехідні енергетичні системи, великі енергоспоживчі системи, паливно-ресурсні економіки та країни з традиційною викопно-паливною структурою. На основі отриманих результатів сформовано диференційовані рекомендації щодо політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів.

Рік виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи – 2026.
Рік захисту роботи – 2026.

Ключові слова: відновлювана енергетика, енергоспоживання, вуглецева інтенсивність, декарбонізація, кластерний аналіз, K-means, BIRCH, DBSCAN, карта Кохонена.

В і д г у к
про кваліфікаційну бакалаврську роботу
здобувача освітньо-професійної програми «Економічна кібернетика»
Тасенка Дениса Віталійовича
на тему: «Моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу за
показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності економіки»

1. *Актуальність теми* обумовлюється необхідністю трансформації енергетичних систем країн світу в умовах посилення кліматичних викликів, зростання попиту на енергетичні ресурси та потреби у скороченні викидів парникових газів. Розвиток відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності та зменшення вуглецевої інтенсивності є важливими передумовами забезпечення енергетичної безпеки, конкурентоспроможності та довгострокової стійкості економік. Оскільки країни суттєво відрізняються за структурою енергоспоживання, залежністю від викопного палива та можливостями впровадження низьковуглецевих технологій, комплексне моделювання їхнього енергетичного розвитку є актуальним і своєчасним напрямом дослідження.

2. *Позитивні риси кваліфікаційної бакалаврської роботи.* У роботі проведено ґрунтовний аналіз теоретичних основ енергетичного розвитку, відновлюваної енергетики, декарбонізації та екологізації економіки. Автором обґрунтовано систему показників, що комплексно характеризують економічні, енергетичні, структурні та екологічні особливості країн світу. У дослідженні вдало поєднано стандартизацію даних, кореляційний аналіз, методи кластеризації K-means, BIRCH і DBSCAN, а також самоорганізаційні карти Кохонена. Для оцінювання результатів використано коефіцієнт силуету, індекси Калінського-Харабаша та Девіса-Боулдіна й агрегований показник AV. Отримані результати належним чином візуалізовано та змістовно інтерпретовано з точки зору економіки та енергетики.

3. *Наявність самостійних розробок автора* полягає у формуванні та підготовці інформаційної бази за країнами світу у 2011–2022 роках за 18

показниками. Автор самостійно реалізовано алгоритми кластеризації, виконано підбір параметрів і порівняння отриманих результатів за формальними метриками та економічною інтерпретацією. Побудовані карти Кохонена дозволили відобразити подібність енергетичних профілів країн і простежити динаміку зміни їхнього положення протягом досліджуваного періоду. На основі результатів моделювання виокремлено типові групи країн та сформовано відповідні рекомендації.

4. Цінність теоретичних висновків та практичних рекомендацій.

Запропонований методичний підхід дозволяє комплексно оцінювати енергетичний розвиток країн за сукупністю взаємопов'язаних економічних, енергетичних та екологічних характеристик. Практичне значення результатів полягає у можливості використання отриманої кластерної типології для порівняння національних енергетичних систем, визначення їхніх сильних сторін і структурних обмежень. Сформовані рекомендації враховують особливості країн із розвинутою низьковуглецевою енергетикою, перехідних енергетичних систем, великих енергоспоживчих економік, паливно-ресурсних держав і країн із традиційною викопно-паливною структурою. Отримані результати можуть бути використані для інформаційно-аналітичної підтримки рішень у сфері енергетичної політики та розвитку відновлюваних джерел енергії.

5. Наявність недоліків. У межах подальшого розвитку дослідження доцільно було б доповнити проведене моделювання сценарним прогнозуванням зміни енергетичних профілів і кластерної належності країн після 2022 року. Це дозволило б оцінити можливі траєкторії розвитку відновлюваної енергетики з урахуванням нових економічних, технологічних і геополітичних викликів. Проте зазначений аспект виходить за межі поставлених завдань і є радше рекомендацією щодо подальшого розвитку дослідження.

6. Загальна оцінка кваліфікаційної бакалаврської роботи та її допущення до захисту перед ЕК: кваліфікаційна бакалаврська робота Тасенка Дениса Віталійовича заслуговує на високу оцінку та може бути рекомендована до захисту перед екзаменаційною комісією.

Науковий керівник:

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри штучного інтелекту,
моделювання та статистики

Київського національного економічного
університету імені Вадима Гетьмана

_____ Андрій МАТВІЙЧУК
(підпис)

“ ____ ” червня 2026 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ.....	8
1.1 Сутність енергетичного розвитку та його роль в економіці країни	8
1.2 Вуглецева інтенсивність та екологізація економічного розвитку	14
РОЗДІЛ 2 ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН СВІТУ	21
2.1 Обґрунтування системи показників дослідження	21
2.2 Формування бази даних.....	25
2.3 Попередня обробка та стандартизація даних	27
2.4 Кореляційний аналіз показників.....	29
2.5 Обґрунтування використання методів кластерного аналізу.....	32
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН СВІТУ ТА ФОРМУВАННЯ ПОЛІТИК ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	38
3.1 Порівняльне оцінювання методів кластеризації країн.....	38
3.2 Побудова та інтерпретація карти Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики.....	50
3.3 Побудова та інтерпретація карти Кохонена для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів	61
3.4 Рекомендації щодо формування політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів.....	69
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
ДОДАТОК А.....	85

ВСТУП

У сучасних умовах розвиток світової економіки дедалі тісніше пов'язаний із трансформацією енергетичних систем. Енергетика впливає не лише на виробництво, транспорт, інфраструктуру та рівень життя населення, а й на екологічну безпеку, інвестиційну привабливість і довгострокову стійкість країн. Зростання попиту на енергію, посилення кліматичних викликів і необхідність скорочення викидів парникових газів зумовлюють потребу в переході до більш ефективних, низьковуглецевих та екологічно орієнтованих моделей енергетичного розвитку.

Актуальність теми визначається зростанням ролі енергетичного розвитку у забезпеченні економічної стабільності, конкурентоспроможності та довгострокової стійкості країн світу. Енергетика є базовою умовою функціонування промисловості, транспорту, інфраструктури, сфери послуг і домогосподарств, тому якість енергетичної системи безпосередньо впливає на можливості економічного зростання. Водночас у сучасних умовах енергетичний розвиток не може оцінюватися лише за обсягами виробництва або споживання енергії. Важливого значення набувають структура енергоспоживання, рівень енергоефективності, залежність від викопного палива, розвиток відновлюваних джерел енергії та вуглецева інтенсивність економіки.

Особливої актуальності набуває проблема переходу країн до більш екологічних і низьковуглецевих моделей розвитку. Традиційна залежність від вугілля, нафти й газу призводить до зростання викидів парникових газів, посилення кліматичних ризиків і підвищення екологічного навантаження на економіку. У зв'язку з цим країни світу дедалі активніше впроваджують відновлювані джерела енергії, розвивають низьковуглецеву електроенергетику, модернізують енергетичну інфраструктуру та формують політику декарбонізації. Проте темпи та характер такого переходу суттєво відрізняються між країнами, оскільки вони

мають різний рівень економічного розвитку, структуру промисловості, енергетичні ресурси, інвестиційні можливості та державну політику.

Дослідження розвитку відновлюваної енергетики у взаємозв'язку з показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності є важливим, оскільки дозволяє не лише оцінити окремі характеристики енергетичних систем, а й виявити типові групи країн зі схожими енергетичними профілями. Такий підхід дає змогу перейти від описового аналізу окремих показників до комплексного моделювання енергетичного розвитку країн світу. Саме тому використання методів багатовимірної аналізу, зокрема кластеризації, є доцільним для виявлення закономірностей розвитку відновлюваної енергетики, оцінювання відмінностей між країнами та формування рекомендацій щодо політики впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) для різних груп держав.

Питання енергетичного розвитку, відновлюваної енергетики, декарбонізації та вуглецевої інтенсивності економіки розглядаються у працях українських і зарубіжних науковців. А. Холод досліджує альтернативну енергетику як чинник трансформації енергетичного сектору та підкреслює її роль у формуванні більш екологічної енергетичної системи [1]. І. Андрійчук, П. Наритник та У. Витвицька аналізують інноваційні чинники розвитку відновлюваної енергетики України, зокрема технологічні, інвестиційні та управлінські умови її прискорення [2]. В. Пшибельський розглядає відновлювану енергетику як один із чинників становлення зеленої економіки України та пов'язує її розвиток із модернізацією енергетичного сектору й наближенням до європейських підходів сталого розвитку [3].

У зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється міжкраїновому аналізу енергетичного переходу. В. Дуго, Д. Гальвес-Руїс та П. Діас-Кувас застосовують часовий кластерний аналіз для оцінювання сталого енергетичного розвитку європейських країн і показують, що енергетичний розвиток є динамічним процесом зміни позицій країн у часі [4]. А. Alotaif та співавтори використовують методи машинного навчання і кластеризації для виділення типових моделей низьковуглецевого переходу в електроенергетиці [5]. У звітах IRENA та

Міжнародного енергетичного агентства енергетичний перехід розглядається як системна трансформація, що охоплює розвиток відновлюваної генерації, електрифікацію, підвищення енергоефективності, модернізацію інфраструктури та скорочення викидів [6; 7].

Сучасні дослідження також підкреслюють важливість застосування кількісних методів для аналізу енергетичних систем. К. Ukoba, О. Onisuru та Т.-С. Jen обґрунтовують можливості використання машинного навчання у сфері відновлюваної енергетики та пом'якшення наслідків зміни клімату [8]. К. Peng та співавтори розглядають низьковуглецевий перехід в електроенергетиці як багатовимірний процес, що впливає не лише на викиди, а й на соціально-економічні та екологічні результати розвитку [9]. Для України важливим практичним орієнтиром є Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року, який визначає розвиток ВДЕ як один із напрямів енергетичної політики держави [10].

Незважаючи на значну кількість наукових праць, недостатньо розкритою залишається проблема комплексного міжкраїнового порівняння енергетичного розвитку за сукупністю економічних, енергетичних, структурних та екологічних показників. Значна частина досліджень зосереджується або на окремих аспектах розвитку відновлюваної енергетики, або на аналізі енергетичної політики певних країн чи регіонів. Водночас потребує подальшого дослідження питання групування країн за подібністю їхніх енергетичних профілів із одночасним урахуванням рівня економічного розвитку, структури електроенергетики, частки ВДЕ, ролі низьковуглецевих джерел, споживання викопного палива, енергоємності та вуглецевої інтенсивності економіки.

Метою цієї бакалаврської роботи є аналіз та моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу на основі показників енергоспоживання, структури виробництва електроенергії та вуглецевої інтенсивності економіки, а також формування рекомендацій щодо політики впровадження відновлюваної енергетики на рівні країн.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі завдання:

1. Розкрити теоретичні основи енергетичного розвитку, його роль в економіці країни та зв'язок з екологізацією економічного розвитку.
2. Охарактеризувати сутність вуглецевої інтенсивності та значення відновлюваної енергетики у переході до низьковуглецевої моделі розвитку.
3. Обґрунтувати систему показників для аналізу енергетичного розвитку країн світу.
4. Сформувати інформаційну базу дослідження, здійснити попередню обробку даних і стандартизацію показників.
5. Провести кореляційний аналіз економічних, енергетичних та екологічних показників.
6. Обґрунтувати використання методів кластерного аналізу та застосувати методи K-means, BIRCH, DBSCAN і карти Кохонена для моделювання енергетичного розвитку країн світу.
7. Порівняти результати кластеризації, визначити групи країн зі схожими енергетичними профілями та проаналізувати основні закономірності їхнього розвитку.
8. Сформувати рекомендації щодо політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів.

Об'єктом дослідження є процеси формування та трансформації енергетичного розвитку країн світу в умовах переходу до екологічно орієнтованої економіки.

Предметом дослідження є показники енергоспоживання, розвитку відновлюваної енергетики та вуглецевої інтенсивності економіки країн світу, а також методи їх аналізу та моделювання.

Методи дослідження. У роботі використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження: аналіз і синтез - для узагальнення теоретичних підходів до енергетичного розвитку, відновлюваної енергетики та вуглецевої інтенсивності; порівняльний аналіз - для зіставлення енергетичних характеристик країн; методи описової статистики - для попереднього аналізу даних; Z-стандартизацію - для

приведення показників до порівнюваного масштабу; кореляційний аналіз - для визначення взаємозв'язків між економічними, енергетичними та екологічними показниками; методи кластерного аналізу K-means, BIRCH і DBSCAN - для групування країн за подібністю енергетичних профілів; самоорганізаційні карти Кохонена - для візуалізації багатовимірних енергетичних характеристик країн і аналізу їхнього положення у просторі ознак; коефіцієнт силуету, індекс Калінського - Харабаша, індекс Девіса - Болдіна та агрегований показник AV - для оцінювання якості кластеризації.

Теоретична, методична та практична значущість отриманих результатів. Теоретичне значення роботи полягає в узагальненні підходів до аналізу енергетичного розвитку, відновлюваної енергетики, вуглецевої інтенсивності та екологізації економіки. Методична значущість полягає у формуванні системи з вісімнадцяти показників, які комплексно характеризують економічні, енергетичні, структурні та екологічні особливості країн світу, а також у застосуванні методів кластеризації для виявлення типових енергетичних профілів. Практична значущість результатів полягає у можливості використання отриманих кластерів для порівняння країн, оцінювання рівня розвитку відновлюваної та низьковуглецевої енергетики, виявлення груп країн із подібними проблемами та формування диференційованих рекомендацій щодо політики впровадження ВДЕ.

Джерела даних. Інформаційною основою дослідження є дані Світового банку DataBank / World Development Indicators, а також інші відкриті міжнародні статистичні джерела. Для аналізу використано показники, що характеризують економічний розвиток, структуру електроенергетики, загальне енергоспоживання, імпорт енергії, експорт палива, промислову структуру, урбанізацію, розвиток відновлюваної та низьковуглецевої енергетики, енергоємність, вуглецеву інтенсивність, а також споживання вугілля, газу та нафти.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та переліку використаних джерел та додатка. Вона містить 78 сторінок, 11 таблиць, 9 рисунків, перелік використаних джерел з 48 найменувань та 1 додаток.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ

1.1 Сутність енергетичного розвитку та його роль в економіці країни

Енергетичний розвиток країни є одним із ключових напрямів загального соціально-економічного розвитку, оскільки саме енергетика забезпечує функціонування майже всіх сфер господарства. Його можна розглядати як процес формування, модернізації та ефективного використання енергетичного потенціалу держави, що включає виробництво, транспортування, розподіл і споживання енергетичних ресурсів. Енергетичний сектор не існує окремо від економіки, адже він безпосередньо пов'язаний із промисловістю, транспортом, сільським господарством, житлово-комунальним сектором та сферою послуг. Тому рівень розвитку енергетики значною мірою визначає стабільність економічної системи, її виробничі можливості та здатність до довгострокового зростання [11].

У зарубіжній науковій літературі енергетичний розвиток часто розглядається не лише через обсяги видобутку або споживання енергоресурсів, а через доступ суспільства до якісних енергетичних послуг. Енергія є важливою не сама по собі, а через ті функції, які вона забезпечує: освітлення, опалення, охолодження, роботу обладнання, транспортні перевезення, цифрову інфраструктуру та побутовий комфорт. Тому економічний розвиток країни залежить не тільки від кількості використаної енергії, а й від її доступності, надійності та ефективності використання. Такий підхід дозволяє ширше оцінювати роль енергетики в економіці, оскільки вона виступає основою не лише виробничих процесів, а й якості життя населення.

Енергетичний розвиток також пов'язаний із технологічною модернізацією. Чим вищим є рівень розвитку економіки, тим більш складними стають її енергетичні потреби. Для сучасного виробництва важливе не просто постачання палива або електроенергії, а стабільність, гнучкість і якість енергетичних послуг. Наприклад, розвиток високотехнологічної промисловості, цифрових сервісів і транспортної інфраструктури потребує надійних енергетичних систем, які здатні швидко реагувати на зміну попиту. Отже, енергетичний розвиток є не лише ресурсною основою економіки, а й умовою її технологічного оновлення [12].

Важливість енергетичного сектору для економіки пояснюється тим, що він впливає на конкурентоспроможність країни. Доступність і стабільність енергопостачання визначають витрати підприємств, собівартість продукції та інвестиційну привабливість національної економіки. Якщо енергетична система працює ефективно, підприємства мають можливість планувати виробництво, знижувати ризики та підвищувати продуктивність. Натомість нестабільність енергопостачання, високі ціни на енергоносії або залежність від імпорту можуть стримувати економічну активність і послаблювати позиції країни на міжнародному ринку [13].

Енергія є одним із фундаментальних ресурсів економічного виробництва. У традиційних економічних підходах основними факторами виробництва вважають працю, капітал і технології, проте без енергії ці фактори не можуть бути повністю реалізовані. Виробниче обладнання, транспорт, зв'язок, будівництво, комунальна інфраструктура та цифрові системи потребують постійного енергозабезпечення. Тому енергетичні ресурси доцільно розглядати як базову передумову функціонування сучасної економіки. Якщо доступ до енергії є обмеженим або нестабільним, це безпосередньо знижує продуктивність і може стати перешкодою для економічного зростання.

Водночас роль енергії в економічному розвитку не можна розглядати спрощено. Збільшення енергоспоживання саме по собі не завжди означає ефективний розвиток країни. Якщо економіка використовує багато енергії, але створює відносно невелику додану вартість, це може свідчити про низьку

енергоефективність і технологічну відсталість. Навпаки, розвинені економіки поступово переходять до моделі, за якої зростання ВВП може відбуватися без пропорційного збільшення споживання енергії. Це досягається завдяки модернізації виробництва, розвитку сфери послуг, цифровізації та впровадженню енергоощадних технологій [14].

У сучасних умовах поняття енергетичного розвитку дедалі частіше пов'язують з енергетичним переходом. Йдеться про поступову зміну традиційної енергетичної моделі, яка базувалася переважно на викопному паливі, на користь більш сталої, низьковуглецевої та технологічно оновленої системи. Такий перехід включає розвиток відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності, декарбонізацію виробництва, модернізацію мереж і зміну поведінки споживачів. Енергетичний перехід не є лише екологічним процесом, оскільки він впливає на інвестиції, зайнятість, структуру промисловості та довгострокову конкурентоспроможність країни [15].

Енергетичний перехід змінює саму логіку економічного розвитку. Якщо раніше пріоритетом було нарощування виробництва енергії для задоволення зростаючого попиту, то сьогодні важливішим стає питання ефективності, екологічності та стійкості енергетичної системи. Це означає, що країни мають не лише виробляти більше енергії, а й краще управляти її споживанням, зменшувати втрати, розвивати гнучкі мережі та створювати умови для використання чистіших технологій. У цьому контексті енергетичний розвиток стає частиною ширшої політики сталого розвитку.

Зв'язок між енергоспоживанням і економічним зростанням є одним із важливих напрямів досліджень в енергетичній економіці. У наукових працях аналізується, чи є споживання енергії причиною економічного зростання, чи навпаки - зростання економіки формує більший попит на енергоресурси. Це питання має практичне значення для державної політики. Якщо економіка сильно залежить від енергоспоживання, то різке обмеження використання енергії може негативно вплинути на виробництво. Якщо ж країна здатна підвищувати

ефективність і впроваджувати нові технології, вона може підтримувати економічне зростання без суттєвого збільшення енергетичного навантаження [16].

Енергетичний розвиток країни також залежить від рівня диверсифікації джерел енергії. Для економіки небезпечно спиратися лише на один вид енергоресурсів або один напрям постачання, оскільки це посилює вразливість до цінових коливань, політичних конфліктів, технічних аварій або зовнішніх обмежень. Диверсифікована енергетична система дозволяє країні гнучкіше реагувати на зміни зовнішнього середовища та знижувати ризики для економіки. Саме тому поєднання традиційних, атомних, гідроенергетичних і відновлюваних джерел може розглядатися як важлива умова енергетичної стабільності [17].

У глобальному вимірі енергетичний розвиток визначається не тільки економічними, а й демографічними та технологічними факторами. Зростання населення, урбанізація, розвиток промисловості, розширення транспортної інфраструктури та збільшення побутового споживання підвищують попит на енергетичні послуги. Водночас технологічний прогрес може змінювати характер цього попиту. З одного боку, нові галузі економіки потребують додаткової енергії, а з іншого - інновації дозволяють зменшувати енергетичні витрати та підвищувати ефективність споживання. Тому енергетичний розвиток є динамічним процесом, який змінюється разом зі структурою економіки та суспільства [18].

Одним із найважливіших показників якості енергетичного розвитку є енергоефективність. Вона характеризує здатність економіки створювати продукцію, послуги та додану вартість із меншими витратами енергії. Висока енергоефективність свідчить про технологічну модернізацію, раціональне використання ресурсів і нижчий рівень виробничих витрат. Низька енергоефективність, навпаки, призводить до надмірного споживання енергоресурсів, зростання собівартості продукції та посилення екологічного навантаження. Тому підвищення енергоефективності є важливим напрямом як економічної, так і енергетичної політики.

Питання енергоефективності особливо важливе для країн, які мають застарілу виробничу базу або значну залежність від енергоємних галузей. У таких

умовах економічне зростання може супроводжуватися надмірним споживанням енергії, що робить економіку вразливою до зміни цін на енергоносії. Модернізація обладнання, впровадження енергоощадних технологій, оновлення інфраструктури та скорочення втрат у мережах дозволяють зменшити енергетичні витрати без зниження обсягів виробництва. Отже, енергоефективність виступає одним із механізмів підвищення економічної стійкості країни [19].

У науковій літературі підкреслюється, що зв'язок між енергією та економічним зростанням не є однаковим для всіх країн. Він залежить від структури економіки, рівня розвитку промисловості, технологічного потенціалу, якості інституцій та характеру енергетичної політики. Для індустріальних країн із великою часткою важкої промисловості енергоспоживання може бути тісніше пов'язане з динамікою ВВП. Для постіндустріальних економік, де більшу роль відіграє сфера послуг і цифрові технології, цей зв'язок може бути слабшим. Тому аналіз енергетичного розвитку потребує врахування конкретних особливостей кожної країни [20].

Важливою складовою енергетичного розвитку є енергетична стійкість. Вона означає здатність енергетичної системи забезпечувати стабільне постачання енергії навіть за умов криз, зовнішніх загроз, технічних аварій або різких змін попиту. Для економіки це має велике значення, оскільки перебої в енергопостачанні швидко впливають на виробництво, транспорт, комунальні послуги та соціальну сферу. Якщо енергетична система є недостатньо стійкою, будь-які зовнішні шоки можуть спричинити зростання витрат, падіння виробництва та погіршення інвестиційного клімату.

Енергетична стійкість також пов'язана з енергетичною безпекою. Країна має бути здатною забезпечити себе необхідними енергоресурсами за прийнятними цінами та з мінімальними ризиками для економіки. Це передбачає не лише наявність джерел енергії, а й надійність інфраструктури, диверсифікацію постачання, розвиток внутрішнього виробництва, ефективне управління попитом і здатність швидко відновлювати роботу системи після кризових ситуацій. У цьому

сенсі енергетичний розвиток є складовою національної безпеки та довгострокової економічної стабільності [21].

Розвиток відновлюваної енергетики є одним із центральних напрямів сучасної трансформації енергетичних систем. Відновлювані джерела енергії дозволяють зменшити залежність від викопного палива, скоротити викиди парникових газів і створити нові можливості для інвестицій. Їхнє значення полягає не лише в екологічному ефекті, а й у формуванні нових секторів економіки, розвитку інноваційних технологій і підвищенні енергетичної незалежності. За умови належної державної політики відновлювана енергетика може стати чинником економічної модернізації.

Однак позитивний вплив відновлюваної енергетики на економіку не є автоматичним. Він залежить від розвитку електромереж, інвестиційного середовища, доступності технологій, системи державного регулювання та здатності енергетичного ринку інтегрувати нові джерела генерації. Якщо відновлювані джерела впроваджуються без достатньої інфраструктури, їхній ефект може бути обмеженим. Якщо ж їхній розвиток поєднується з модернізацією мереж, накопичувачами енергії, цифровим управлінням і підвищенням енергоефективності, вони здатні посилити економічну стійкість країни [22].

Енергетичний розвиток також можна розглядати як елемент моделі економічного зростання. Енергетичний сектор впливає на виробництво, інвестиції, зайнятість, інновації та зовнішньоекономічні зв'язки. Водночас сама економіка формує попит на енергію, визначає структуру споживання та можливості для модернізації енергетичної системи. Тому між енергетикою та економікою існує взаємозалежність, де енергетика забезпечує економічну активність, а економічний розвиток створює ресурси для оновлення енергетичного сектору.

У межах такої взаємозалежності важливо враховувати не лише кількісні, а й якісні характеристики енергетичного розвитку. Країна може споживати значні обсяги енергії, але залишатися малоефективною, якщо її виробництво є енергоємним, технології застарілими, а структура енергоспоживання залежною від викопного палива. Натомість сучасна модель енергетичного розвитку передбачає

раціональне використання ресурсів, зниження втрат, розвиток чистих технологій і поступове зменшення вуглецевого навантаження на економіку. Саме такі характеристики дедалі більше визначають якість економічного зростання.

У зарубіжних дослідженнях також зазначається, що відновлювана енергетика може мати різний вплив на економічне зростання залежно від групи країн, рівня доходу та структури енергетичного ринку. Для одних країн вона є способом зменшення імпортової залежності та створення нових галузей, для інших - інструментом виконання кліматичних зобов'язань і підвищення технологічної конкурентоспроможності. Це означає, що енергетична політика має бути адаптована до конкретних умов країни, а не копіювати універсальні рішення без урахування національних особливостей [23].

Таким чином, енергетичний розвиток країни є комплексним процесом, який охоплює виробництво, постачання, споживання, ефективність використання та екологічну трансформацію енергії. Його роль в економіці полягає у забезпеченні стабільної роботи підприємств, розвитку інфраструктури, підвищенні конкурентоспроможності, зміцненні енергетичної безпеки та створенні умов для переходу до сталої моделі господарювання. У сучасних умовах успішний енергетичний розвиток має поєднувати економічну ефективність, технологічну модернізацію, екологічну відповідальність і стійкість до зовнішніх ризиків.

1.2 Вуглецева інтенсивність та екологізація економічного розвитку

Екологізація економіки є ширшим поняттям, ніж просте скорочення викидів або впровадження окремих природоохоронних заходів. Вона передбачає поступове включення екологічних обмежень у систему економічного планування, державного регулювання, підприємницької діяльності та інвестиційної політики. У цьому контексті екологізація означає зміну самої логіки економічного розвитку: природні

ресурси та якість довкілля розглядаються не як другорядні фактори, а як умови довгострокової стабільності економіки. Тому сучасний розвиток держави не може оцінюватися лише за темпами зростання ВВП, обсягами виробництва чи рівнем доходів населення. Важливо також враховувати, наскільки таке зростання є безпечним для навколишнього середовища і чи не створює воно надмірного навантаження на природні системи [24].

Проблема поєднання економічного зростання та охорони довкілля розглядається також у межах концепції екологічної кривої Кузнеця. Її суть полягає в тому, що на початкових етапах економічного розвитку забруднення зазвичай зростає, оскільки країни активно нарощують промислове виробництво, розвивають інфраструктуру та збільшують споживання енергії. Проте на вищих рівнях доходу може відбуватися поступове зниження екологічного навантаження завдяки технологічній модернізації, посиленню екологічного регулювання, розвитку сфери послуг і зростанню суспільного попиту на чистіше довкілля. Водночас цю концепцію не можна сприймати як автоматичний закон розвитку, оскільки саме по собі економічне зростання не гарантує зменшення викидів. Для цього потрібні цілеспрямована політика, інвестиції в чисті технології та зміна структури енергоспоживання [25].

Декарбонізація економіки є одним із головних практичних напрямів екологізації. Її зміст полягає у поступовому зменшенні залежності економіки від викопного палива та скороченні викидів вуглекислого газу й інших парникових газів. Декарбонізація охоплює не лише енергетику, а й промисловість, транспорт, будівництво, житлово-комунальне господарство та сферу споживання. Для України та світу це питання є особливо актуальним через посилення кліматичних викликів, необхідність виконання міжнародних зобов'язань і потребу в оновленні застарілої виробничої та енергетичної інфраструктури. Отже, декарбонізацію варто розглядати як комплексний процес, що поєднує технологічні, економічні, інституційні та соціальні зміни [26].

Екологізація економіки тісно пов'язана з переходом до моделі сталого розвитку. Такий підхід передбачає, що економічні, соціальні та екологічні цілі

мають розглядатися не окремо, а як взаємопов'язані складові розвитку. Якщо економіка зростає за рахунок виснаження ресурсів, забруднення повітря, води та ґрунтів, то таке зростання створює ризики для майбутніх поколінь. Саме тому екологізація передбачає не лише зменшення шкоди для довкілля, а й переорієнтацію виробництва, споживання та управління на більш раціональне використання ресурсів. У такому розумінні вона виступає не обмеженням економічного розвитку, а умовою його довгострокової стабільності [27].

На рівні виробництва екологізація передбачає впровадження технологій і організаційних рішень, які зменшують негативний вплив підприємств на довкілля. До таких рішень належать очищення викидів і стічних вод, повторне використання відходів, упровадження маловідходних і ресурсозберігаючих технологій, модернізація обладнання та розвиток систем екологічного менеджменту. Для проблеми вуглецевої інтенсивності це має безпосереднє значення, оскільки саме виробничий сектор часто є одним із головних джерел викидів. Якщо підприємства зменшують енергетичні витрати та переходять на чистіші технології, це сприяє скороченню викидів на одиницю продукції та підвищує екологічну ефективність економіки загалом [28].

Значну роль у зниженні вуглецевої інтенсивності відіграє розвиток відновлюваної енергетики. Сонячна, вітрова, гідроенергетика та інші відновлювані джерела дають змогу поступово замінювати викопне паливо у виробництві електроенергії. Однак сам факт збільшення частки відновлюваної енергії не завжди автоматично означає швидке скорочення викидів. Якщо загальний попит на енергію зростає дуже швидко, а промисловість залишається енергоємною, ефект від ВДЕ може бути обмеженим. Тому розвиток відновлюваної енергетики має поєднуватися з підвищенням енергоефективності, модернізацією електромереж, розвитком накопичувачів енергії та зміною структури кінцевого споживання [29].

Питання екологічного менеджменту також має важливе значення для екологізації економічного розвитку. Екологічний менеджмент можна розглядати як систему управління, що спрямована на зменшення екологічних ризиків, раціональне використання ресурсів і підвищення відповідальності підприємств за

вплив на довкілля. У контексті вуглецевої інтенсивності це означає, що підприємства повинні не лише виконувати мінімальні вимоги законодавства, а й самостійно шукати способи скорочення енергоспоживання, зменшення викидів і підвищення ефективності виробничих процесів. Такий підхід поступово змінює роль бізнесу, він стає не тільки джерелом економічного результату, а й учасником екологічної трансформації [30].

Низьковуглецева економіка формується як модель розвитку, у межах якої економічне зростання має супроводжуватися мінімізацією викидів парникових газів. Її ключовою особливістю є не відмова від розвитку, а зміна його технологічної та енергетичної основи. Це означає, що економіка повинна створювати додану вартість за рахунок інновацій, ефективного використання ресурсів, чистішої енергетики та модернізації виробництва. Важливо, що низьковуглецевий розвиток не обмежується лише екологічними цілями. Він також пов'язаний із конкурентоспроможністю, інвестиційною привабливістю, енергетичною безпекою та здатністю країни адаптуватися до нових міжнародних правил [31].

Концепція низьковуглецевого розвитку поступово пройшла шлях від переважно екологічної ідеї до важливого напрямку економічної політики. Спочатку основна увага приділялася скороченню забруднення та обмеженню негативного впливу промисловості на природу. Згодом низьковуглецевий розвиток почали розглядати як частину стратегічної трансформації економіки, що охоплює енергетику, транспорт, фінанси, інновації та міжнародну торгівлю. Такий підхід є особливо важливим для країн, які прагнуть інтегруватися у світові ринки, оскільки екологічні стандарти дедалі більше впливають на доступ до капіталу, технологій і зовнішніх ринків [32].

Відновлювана енергетика має особливе значення для країн із високою вуглецевою інтенсивністю. Якщо енергетична система значною мірою залежить від вугілля, нафти або газу, то перехід до ВДЕ може стати одним із головних способів зменшення викидів. Водночас ефективність такого переходу залежить від економічних, технологічних та інституційних умов. Наприклад, країна повинна

мати достатні інвестиції, надійну енергетичну інфраструктуру, можливості балансування електромережі та стабільну державну політику. Без цих умов розвиток ВДЕ може бути повільним або нестабільним, навіть якщо природний потенціал для сонячної чи вітрової енергетики є значним [33].

Екологізація соціально-економічної системи передбачає, що екологічні принципи мають бути інтегровані не лише у виробництво, а й у споживання, державне управління, освіту, інвестиційну діяльність і поведінку населення. Це означає, що зниження вуглецевої інтенсивності не може бути досягнуте лише за рахунок окремих технічних заходів. Необхідні зміни в економічних стимулах, суспільних цінностях і системі управління. Наприклад, важливими стають розвиток екологічної культури, підтримка енергоощадної поведінки, екологічна відповідальність бізнесу та формування державної політики, яка заохочує ресурсозбереження [34].

Сучасні міжнародні дослідження показують, що повне роз'єднання економічного зростання та викидів залишається складним завданням для більшості країн світу. Частина розвинених держав уже демонструє зниження викидів на фоні зростання економіки, але для багатьох країн цей зв'язок залишається достатньо сильним. Це пояснюється різною структурою економіки, рівнем технологічного розвитку, якістю інституцій і залежністю від викопного палива. Тому порівняння країн лише за загальними обсягами викидів є недостатнім. Більш змістовним є аналіз вуглецевої інтенсивності, енергоемності, частки ВДЕ та здатності економіки зростати без збільшення екологічного навантаження [35].

Для України питання екологізації економіки має особливе значення в умовах європейської інтеграції. Європейський Союз послідовно посилює екологічні вимоги до виробництва, енергетики, транспорту та зовнішньої торгівлі. Це означає, що українська економіка повинна адаптуватися до нових умов, зокрема через модернізацію промисловості, розвиток відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності та скорочення викидів. Якщо ці процеси будуть реалізовані послідовно, екологізація може стати не лише вимогою зовнішнього

середовища, а й можливістю для технологічного оновлення, залучення інвестицій і підвищення конкурентоспроможності українських підприємств [36].

Зелена економіка є ще одним важливим напрямом, пов'язаним зі зниженням вуглецевої інтенсивності. Вона передбачає розвиток секторів, які створюють економічну вартість із меншим навантаженням на довкілля. До таких секторів можна віднести відновлювану енергетику, енергоефективне будівництво, екологічний транспорт, переробку відходів, зелені фінанси та виробництво екологічно безпечної продукції. У цьому контексті зелена економіка виступає не просто природоохоронною концепцією, а моделлю структурної модернізації. Її вплив на вуглецеву інтенсивність проявляється через зміну технологій, структури інвестицій, поведінки споживачів і державної політики [37].

Фінансові інструменти декарбонізації є необхідною умовою практичного переходу до низьковуглецевої економіки. Скорочення викидів, розвиток ВДЕ, модернізація промисловості та підвищення енергоефективності потребують значних інвестицій. Тому важливу роль відіграють зелені облігації, ESG-інвестиції, кліматичні фонди, пільгове кредитування та інші механізми фінансування екологічних проєктів. Такі інструменти дозволяють спрямовувати капітал у ті сфери, які сприяють зменшенню вуглецевої інтенсивності. Крім того, вони змінюють поведінку бізнесу, оскільки підприємства починають враховувати не лише фінансові, а й екологічні показники своєї діяльності [38].

Важливу роль у сучасній екологізації відіграють також інновації. Технологічні зміни дають змогу одночасно підвищувати продуктивність і зменшувати екологічне навантаження. Наприклад, розвиток цифрових систем управління енергоспоживанням, розумних мереж, накопичувачів енергії, електротранспорту та чистих виробничих технологій створює можливості для поступового зниження викидів без зменшення економічної активності. У цьому контексті вуглецева інтенсивність може розглядатися як показник не лише екологічного стану економіки, а й її інноваційної спроможності. Чим швидше країна впроваджує нові технології та змінює структуру енергоспоживання, тим більше шансів вона має знизити викиди на одиницю економічного результату [39].

Отже, вуглецева інтенсивність є комплексним показником, який відображає не тільки обсяг викидів, а й технологічну, енергетичну та галузеву структуру економіки. Висока вуглецева інтенсивність свідчить про значну залежність від викопного палива, високу енергоємність виробництва та недостатній рівень екологічної модернізації. Низька або така, що поступово знижується, вуглецева інтенсивність свідчить про більш ефективне використання ресурсів, розвиток чистіших технологій і поступовий перехід до низьковуглецевої моделі розвитку.

Таким чином, екологізація економічного розвитку передбачає глибоку трансформацію економіки, енергетики, виробництва, фінансів і державної політики. Її головна мета полягає не лише у скороченні викидів, а й у формуванні такої моделі розвитку, за якої економічне зростання не супроводжується пропорційним збільшенням екологічного навантаження. Для подальшого дослідження це має важливе значення, оскільки показники вуглецевої інтенсивності, енергоспоживання та розвитку відновлюваної енергетики можуть бути використані для порівняння країн світу та визначення особливостей їхнього енергетичного й екологічного розвитку.

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН СВІТУ

2.1 Обґрунтування системи показників дослідження

Дослідження енергетичного розвитку країн світу потребує формування такої системи показників, яка дозволяє оцінити не лише безпосередній рівень розвитку відновлюваної енергетики, а й ширший економічний, енергетичний та екологічний контекст. Це пояснюється тим, що розвиток відновлюваних джерел енергії залежить від рівня економічного розвитку країни, структури виробництва електроенергії, загального енергоспоживання, залежності від імпорту енергоресурсів, ролі паливного експорту, рівня індустріалізації, урбанізації та ефективності використання енергії. У практичних дослідженнях декарбонізації також використовується багатофакторний підхід, коли країни аналізуються за сукупністю економічних, енергетичних, торговельних і демографічних індикаторів, а не за одним показником викидів або частки ВДЕ [40].

У межах цього дослідження було сформовано систему з вісімнадцяти показників, які комплексно характеризують енергетичний розвиток країн світу. Такий набір змінних дозволяє врахувати не лише загальний рівень економічного розвитку, енергоспоживання та вуглецеву інтенсивність, а й структуру виробництва електроенергії за джерелами, роль відновлюваних і низьковуглецевих джерел, а також споживання окремих видів викопного палива. Подібна логіка використовується у дослідженнях, де для міжкраїнового аналізу спочатку формується набір релевантних показників, а потім застосовуються кореляційний аналіз, методи зменшення розмірності та кластеризація. Сформовану систему показників дослідження енергетичного розвитку країн світу наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Система показників дослідження енергетичного розвитку країн світу

№	Назва показника в роботі	Зміст показника	Роль у дослідженні
1	ВВП на душу населення	Обсяг ВВП у розрахунку на одну особу	Характеризує рівень економічного розвитку країни
2	Виробництво електроенергії з нафти, газу та вугілля	Частка електроенергії, виробленої з викопного палива	Показує залежність електроенергетики від традиційних джерел
3	Вуглецева інтенсивність економіки	Обсяг викидів CO ₂ на одиницю ВВП	Відображає екологічну ефективність економіки
4	Експорт палива	Частка паливного експорту в товарному експорті	Характеризує сировинну та паливну спеціалізацію країни
5	Загальне енергоспоживання	Загальний обсяг використання енергоресурсів	Показує масштаб енергетичного навантаження на економіку
6	Імпорт енергії	Чистий імпорт енергії у відсотках від енергоспоживання	Відображає залежність країни від зовнішніх джерел енергії
7	Промисловість	Частка промисловості, включно з будівництвом, у ВВП	Дозволяє врахувати роль енергоємного сектору економіки
8	Урбанізація	Частка міського населення	Характеризує рівень інфраструктурного й соціально-економічного розвитку
9	Споживання енергії з відновлюваних джерел	Частка або обсяг використання енергії з відновлюваних джерел	Відображає роль ВДЕ в загальному енергоспоживанні країни
10	Частка електроенергії з низьковуглецевих джерел	Частка електроенергії, виробленої з джерел із низькими викидами CO ₂	Дозволяє оцінити рівень декарбонізації електроенергетики
11	Частка електроенергії з сонця та вітру	Частка сонячної та вітрової генерації у виробництві електроенергії	Характеризує розвиток сучасних відновлюваних джерел енергії
12	Частка електроенергії з відновлюваних джерел	Частка електроенергії, виробленої з ВДЕ	Показує рівень розвитку відновлюваної електроенергетики
13	Альтернативна та ядерна енергетика	Частка альтернативної та ядерної енергії	Дозволяє врахувати роль низьковуглецевих джерел
14	Споживання електроенергії	Обсяг споживання електроенергії	Характеризує рівень електрифікації та енергетичних потреб
15	Рівень енергоємності первинної енергії	Витрати первинної енергії на одиницю ВВП	Відображає ефективність використання енергетичних ресурсів
16	Споживання вугілля	Обсяг використання вугілля в енергетичному балансі країни	Дозволяє оцінити залежність від найбільш вуглецеємного викопного палива

17	Споживання газу	Обсяг використання природного газу	Характеризує роль газу в енергетичній системі країни
18	Споживання нафти	Обсяг використання нафти та нафтопродуктів	Відображає залежність економіки від нафтових ресурсів

Джерело: розроблено автором

Перший блок показників характеризує економічні та структурні особливості країн. До нього належать ВВП на душу населення, частка промисловості у ВВП та рівень урбанізації. ВВП на душу населення дозволяє оцінити загальний рівень економічного розвитку країни та її потенціал для інвестування у модернізацію енергетичної системи. Частка промисловості є важливою, оскільки індустріальний сектор зазвичай формує значну частину попиту на енергію. Рівень урбанізації відображає концентрацію населення в містах, розвиток інфраструктури та характер кінцевого енергоспоживання.

Другий блок охоплює показники загального енергоспоживання та енергетичної залежності. До нього належать загальне енергоспоживання, імпорт енергії, експорт палива, споживання електроенергії та рівень енергоемності первинної енергії. Ці показники дозволяють оцінити, наскільки інтенсивно країна використовує енергетичні ресурси, чи залежить вона від зовнішніх джерел енергопостачання, чи має паливну експортну спеціалізацію, а також наскільки ефективно економіка перетворює енергоресурси в економічний результат. Показники енергоспоживання, імпорту енергії, експорту палива, альтернативної та ядерної енергетики, електроспоживання й енергоемності належать до системи міжнародно порівнюваних індикаторів World Development Indicators.

Окремий блок становлять показники споживання основних видів викопного палива: вугілля, газу та нафти. Їх включення до системи показників є важливим, оскільки загальний показник енергоспоживання не показує, за рахунок яких саме джерел формується енергетичний баланс країни. Споживання вугілля дозволяє оцінити залежність від найбільш вуглецеємного виду палива, споживання газу відображає роль природного газу як перехідного енергоресурсу, а споживання нафти характеризує залежність економіки від нафтових ресурсів, зокрема у транспорті, промисловості та інших секторах.

Третій блок показників характеризує структуру енергетики, електроенергетики та екологічне навантаження. До нього належать виробництво електроенергії з нафти, газу та вугілля, споживання енергії з відновлюваних джерел, частка електроенергії з низьковуглецевих джерел, частка електроенергії з сонця та вітру, частка електроенергії з відновлюваних джерел, альтернативна та ядерна енергетика, а також вуглецева інтенсивність економіки. Такий набір показників дозволяє оцінити не лише загальний рівень розвитку ВДЕ, а й конкретну структуру виробництва електроенергії, що є важливим для аналізу декарбонізації енергетичного сектору. Споживання енергії з відновлюваних джерел відображає рівень переходу до чистіших джерел. Показник альтернативної та ядерної енергетики дозволяє врахувати роль низьковуглецевих джерел, які можуть знижувати вуглецеве навантаження навіть тоді, коли вони не належать до класичних відновлюваних джерел.

Окрему роль у системі показників відіграє рівень енергоємності первинної енергії. Він показує, скільки енергії необхідно країні для створення одиниці економічного продукту. Чим вищим є цей показник, тим менш ефективно економіка використовує енергетичні ресурси. Міжнародне енергетичне агентство зазначає, що енергетична інтенсивність часто використовується як узагальнений індикатор енергоефективності, хоча на агрегованому рівні вона не завжди повністю збігається з технічною ефективністю окремих секторів [41].

Включення показників, пов'язаних із відновлюваною та низьковуглецевою енергетикою, є ключовим для цієї роботи, оскільки вони безпосередньо відображають ступінь переходу країни до чистіших джерел енергії. Водночас ці показники не можна аналізувати ізольовано. Наприклад, висока частка відновлюваної енергії в одній країні може бути результатом розвиненої державної політики та інвестицій у зелену енергетику, а в іншій - наслідком значної ролі гідроенергетики або традиційного використання біомаси. Саме тому до системи показників додатково включено змінні, що деталізують структуру виробництва електроенергії за джерелами: частку електроенергії з низьковуглецевих джерел, частку електроенергії з сонця та вітру, а також частку електроенергії з

відновлюваних джерел. Їх використання дозволяє точніше оцінити рівень розвитку чистої електроенергетики, оскільки загальний показник споживання енергії з відновлюваних джерел не завжди відображає саме структуру електроенергетики. Наприклад, країна може мати значну частку ВДЕ в загальному енергоспоживанні, але водночас низьку частку сучасної сонячної та вітрової генерації. Тому для коректного порівняння країн необхідно враховувати не лише загальну роль відновлюваної енергії, а й структуру електроенергетики, економічний рівень, промислову структуру, енергоємність і вуглецеву інтенсивність. У сучасних українських дослідженнях також підкреслюється, що розвиток відновлюваної енергетики має розглядатися у взаємозв'язку з економічними, технологічними та екологічними умовами функціонування енергетичної системи [42].

Отже, сформована система показників дозволяє комплексно охарактеризувати енергетичний розвиток країн світу. Вона охоплює економічний розвиток, загальне енергоспоживання, споживання окремих видів викопного палива, залежність від імпорту енергії, роль паливного експорту, розвиток відновлюваних і низьковуглецевих джерел, рівень енергоефективності, промислову структуру, урбанізацію, структуру електроенергетики за джерелами та екологічну результативність економіки. Саме така система є основою для подальшого формування бази даних, кореляційного аналізу та кластерного аналізу.

2.2 Формування бази даних

Інформаційною основою дослідження стала міжнародна база DataBank / World Development Indicators Світового банку. Її використання є доцільним, оскільки ця база містить порівнювані між країнами показники економічного розвитку, енергетики, промисловості, урбанізації та екологічної ефективності. Для

роботи з міжнародною вибіркою це особливо важливо, адже дані мають бути отримані за єдиною методологією і бути придатними для порівняння між країнами.

На першому етапі з бази World Development Indicators було відібрано вісімнадцять показників, що відповідають меті дослідження та дозволяють комплексно оцінити економічні, енергетичні, екологічні та структурні характеристики країн світу. Кожен показник завантажувався окремо, після чого дані були приведені до спільної структури. Для кожного спостереження було збережено назву країни, код країни, рік та значення відповідного індикатора. Далі окремі таблиці були об'єднані у спільний датасет, у якому рядки відповідають країнам, а стовпці - відібраним показникам.

Під час формування датасету було важливо забезпечити, щоб у вибірку потрапили саме країни, а не агреговані групи. Тому з бази були вилучені записи на зразок “World”, “High income”, “Low income”, “European Union”, “Euro area”, “Europe & Central Asia” та інші регіональні або доходні групи. Такі спостереження не можна порівнювати з окремими країнами, оскільки вони є агрегатами й мають іншу економічну природу. Їхнє включення могло б спотворити результати кореляційного аналізу та кластеризації.

Після об'єднання показників було проведено перевірку повноти даних. У міжнародних енергетичних базах пропущені значення є типовою проблемою, оскільки не всі країни щорічно подають повну статистику за всіма індикаторами. Особливо це стосується енергетичних і екологічних показників, методологія збору яких може змінюватися або мати часові розриви.

Окрема проблема виникла з показником частки відновлюваної енергії за 2022 рік, оскільки для частини країн значення були відсутні. Просте заповнення пропусків загальним середнім значенням по всій вибірці було б некоректним, адже країни суттєво відрізняються за рівнем економічного розвитку, структурою енергетики, технологічними можливостями та інвестиційним потенціалом. Тому пропущені значення були заповнені не випадково і не за загальним середнім, а з урахуванням класифікації країн за рівнем розвитку.

Для цього було використано додатковий аркуш із класифікацією країн. Країни були поділені на групи за рівнем розвитку, після чого для кожної групи розраховувалося характерне значення показника частки відновлюваної енергії. Якщо для певної країни значення за 2022 рік було відсутнє, воно заповнювалося на основі середнього значення саме для тієї групи, до якої належить країна. Такий підхід є більш обґрунтованим, ніж загальне усереднення, оскільки він враховує, що розвинені країни, країни з перехідною економікою та країни, що розвиваються, мають різні можливості для розвитку відновлюваної енергетики.

Такий підхід дозволяє зменшити ризик викривлення даних, оскільки пропущене значення замінюється не умовним середнім по всіх країнах світу, а значенням, характерним для країн зі схожим рівнем розвитку. У результаті датасет стає придатним для подальшого аналізу, але зберігає економічну логіку й не створює штучного наближення всіх країн до одного усередненого рівня.

Після заповнення пропусків було сформовано фінальну базу даних із вісімнадцяти показників. Вона стала основою для подальших етапів дослідження: стандартизації змінних, побудови кореляційної матриці та кластерного аналізу. Таким чином, формування датасету включало не лише технічне завантаження даних, а й очищення, перевірку, усунення некраїнових спостережень, обробку пропущених значень і підготовку фінальної матриці ознак.

2.3 Попередня обробка та стандартизація даних

Перед застосуванням методів багатовимірного аналізу необхідно виконати попередню обробку даних. Це пов'язано з тим, що обрані показники мають різні одиниці вимірювання та різний масштаб. Наприклад, ВВП на душу населення вимірюється у грошових одиницях, урбанізація - у відсотках, споживання електроенергії, вугілля, газу та нафти - у фізичних або енергетичних одиницях,

частки електроенергії з відновлюваних, низьковуглецевих джерел, сонця та вітру - у відсотках, а вуглецева інтенсивність - як обсяг викидів на одиницю ВВП. Якщо подати такі дані без стандартизації до алгоритму кластеризації, змінні з великим числовим масштабом можуть мати непропорційно сильний вплив на результат.

Попередня обробка даних включала кілька етапів. Спочатку було перевірено правильність структури таблиці, назви змінних, коди країн і наявність дублікатів. Далі було вилучено агреговані територіальні та доходні групи. Після цього було проаналізовано пропущені значення та здійснено їх обґрунтоване заповнення. На завершальному етапі дані були підготовлені до стандартизації та побудови матриці ознак.

У цьому дослідженні доцільним є використання Z-стандартизації. Її суть полягає в тому, що з кожного значення показника віднімається середнє значення цього показника, а результат ділиться на стандартне відхилення. Z-стандартизація здійснюється за формулою (2.1):

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad (2.1)$$

де z_{ij} - стандартизоване значення показника j для країни i ;

x_{ij} - початкове значення показника;

$\bar{x}_j$ - середнє значення показника j ;

s_j - стандартне відхилення показника j .

Після стандартизації всі показники мають порівнюваний масштаб: середнє значення наближається до нуля, а стандартне відхилення - до одиниці. Це дозволяє уникнути ситуації, коли один показник впливає на результати кластеризації лише через більші абсолютні значення. У статті про побудову SOM для моделювання скорочення CO₂ також підкреслюється, що масштабування є необхідним етапом, оскільки методи, які працюють із відстанями між векторами, чутливі до різних порядків величин показників [40].

Отже, попередня обробка і стандартизація даних забезпечують коректність подальшого використання математичних методів.

2.4 Кореляційний аналіз показників

Після формування та стандартизації бази даних наступним етапом є кореляційний аналіз. Його мета полягає у визначенні сили та напрямку зв'язку між обраними показниками. У межах цього дослідження кореляційний аналіз використовується не лише для опису взаємозв'язків, а й для попередньої перевірки можливого дублювання інформації між змінними.

Для оцінювання зв'язків між показниками використовується коефіцієнт кореляції Пірсона, який розраховується за формулою (2.2):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.2)$$

де r_{xy} - коефіцієнт кореляції між показниками x та y ;

x_i, y_i - значення відповідних показників для країни i ;

$\bar{x}, \bar{y}$ - середні значення показників;

n - кількість спостережень.

Для наочного відображення встановлених взаємозв'язків між досліджуваними показниками побудовано кореляційну матрицю, наведену на рис. 2.1. Вона дає змогу одночасно оцінити напрям і силу парних лінійних зв'язків між усіма змінними.

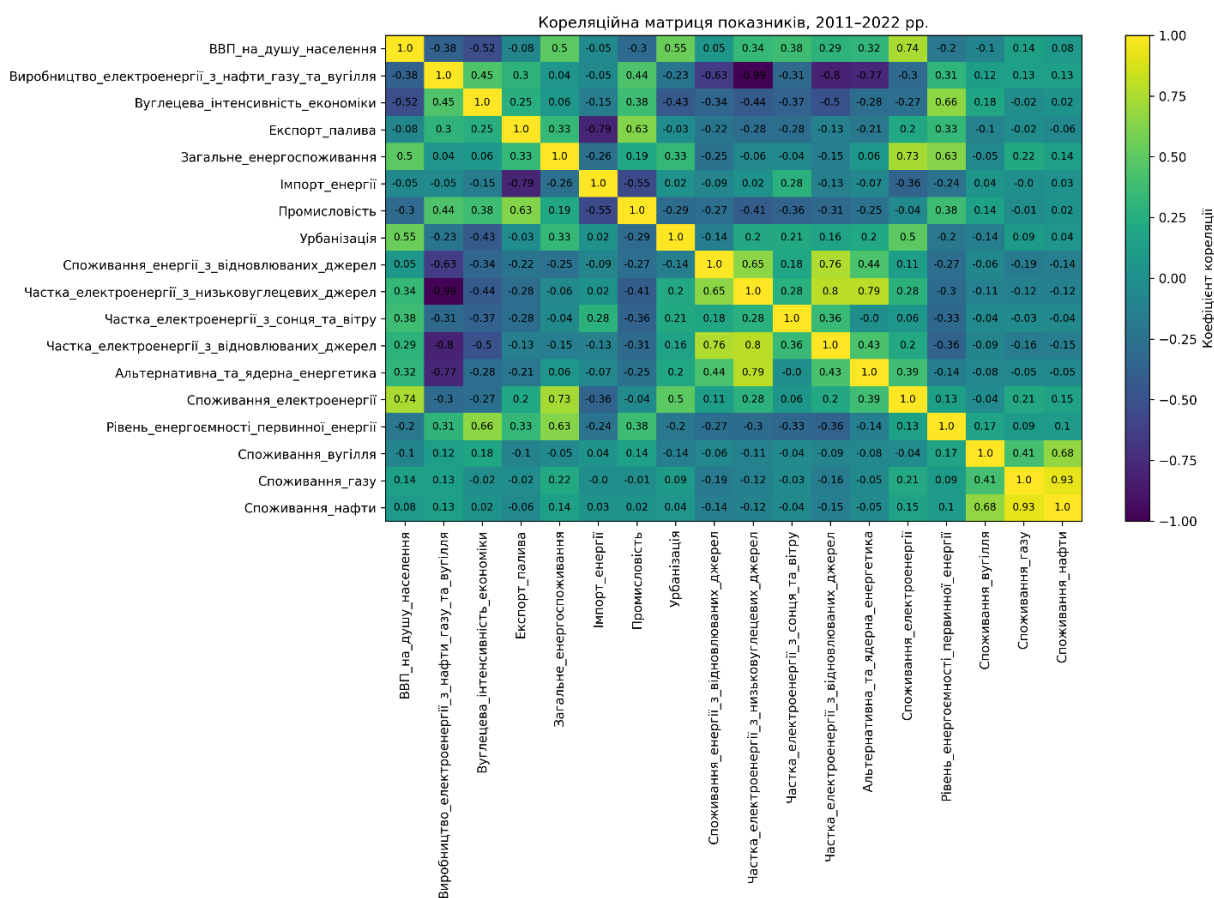


Рисунок 2.1 Кореляційна матриця показників енергетичного розвитку країн світу за 2011–2022 рр.

Джерело: розроблено автором

Як видно з рис. 2.1, кореляційна матриця дозволяє візуально оцінити напрям і силу взаємозв'язків між економічними, енергетичними та екологічними показниками, що використовуються у подальшому моделюванні.

Значення коефіцієнта кореляції перебуває в межах від -1 до 1 : додатні значення свідчать про прямий зв'язок, від'ємні - про обернений, а значення, близькі до нуля, вказують на слабкий або відсутній лінійний зв'язок між показниками.

За результатами кореляційної матриці можна побачити, що ВВП на душу населення має прямий зв'язок зі споживанням електроенергії, урбанізацією, загальним енергоспоживанням, часткою електроенергії з сонця та вітру, а також часткою електроенергії з низьковуглецевих джерел. Водночас між ВВП на душу населення та вуглецевою інтенсивністю економіки спостерігається обернений

зв'язок. Це свідчить про те, що економічно розвинені країни зазвичай мають вищий рівень електрифікації та ширші можливості для розвитку чистіших енергетичних технологій, але нижчий рівень викидів на одиницю економічного результату.

Важливі зв'язки простежуються між структурою електроенергетики та вуглецевою інтенсивністю. Виробництво електроенергії з нафти, газу та вугілля має сильний обернений зв'язок із часткою електроенергії з низьковуглецевих і відновлюваних джерел. Це є логічним, оскільки зростання ролі чистіших джерел енергії зменшує залежність електроенергетики від викопного палива. Також вуглецева інтенсивність прямо пов'язана з енергоємністю первинної енергії та часткою електроенергії з викопного палива, що підтверджує зв'язок між неефективним використанням енергії, традиційною структурою генерації та вищим вуглецевим навантаженням.

Показники відновлюваної та низьковуглецевої енергетики також мають помітні взаємозв'язки між собою. Зокрема, споживання енергії з відновлюваних джерел прямо пов'язане з часткою електроенергії з відновлюваних та низьковуглецевих джерел. Водночас зв'язок із часткою електроенергії з сонця та вітру є слабшим, що пояснюється різною структурою відновлюваної енергетики в країнах: у частини держав значну роль можуть відігравати гідроенергетика або біомаса, а не лише сучасна сонячна чи вітрова генерація.

Окремо слід відзначити сильний прямий зв'язок між споживанням газу та нафти, а також між споживанням вугілля та нафти. Це свідчить про те, що країни з великим масштабом енергоспоживання часто одночасно використовують кілька видів викопного палива. Отже, кореляційний аналіз підтверджує, що обрані показники відображають різні, але взаємопов'язані аспекти енергетичного розвитку. Найбільш важливими для подальшого моделювання є зв'язки між рівнем економічного розвитку, структурою електроенергетики, енергоємністю, споживанням викопного палива та вуглецевою інтенсивністю економіки.

2.5 Обґрунтування використання методів кластерного аналізу

Кластерний аналіз є основним інструментом групування країн у цьому дослідженні. Його використання пояснюється тим, що мета роботи полягає не лише в оцінці окремих показників, а у виявленні груп країн зі схожими характеристиками енергетичного розвитку. На відміну від регресійного аналізу, кластеризація не потребує попереднього визначення залежної змінної. Це особливо важливо для дослідження енергетичного розвитку, оскільки країни можуть відрізнятися одночасно за багатьма параметрами: економічним рівнем, загальним енергоспоживанням, споживанням окремих видів викопного палива, розвитком відновлюваних джерел енергії, часткою електроенергії з низьковуглецевих джерел, роллю сонячної та вітрової генерації, вуглецевою інтенсивністю, імпортною залежністю та структурою промисловості.

У загальному вигляді кластерний аналіз спрямований на поділ множини об'єктів на групи так, щоб об'єкти всередині одного кластера були більш схожими між собою, ніж з об'єктами інших кластерів. У цьому дослідженні об'єктами є країни, а ознаками - стандартизовані значення показників. Кластеризація дозволяє виділити групи країн із подібними моделями енергетичного розвитку: наприклад, країни з високою роллю відновлюваних і низьковуглецевих джерел та низькою вуглецевою інтенсивністю, країни з високим споживанням вугілля, газу або нафти, країни з високою залежністю електроенергетики від викопного палива, країни з розвиненою сонячною та вітровою генерацією, країни з високою енергоємністю або країни з ресурсною паливною спеціалізацією.

У наукових дослідженнях кластеризація активно використовується для групування країн за соціально-економічними та макроекономічними характеристиками. Особливо важливим є те, що вибір методу кластеризації не повинен ґрунтуватися лише на суб'єктивному рішенні дослідника. Доцільно

порівнювати кілька алгоритмів і оцінювати якість отриманих кластерів за формальними метриками [43].

У межах цієї роботи доцільно розглянути кілька методів кластерного аналізу. Це дозволяє не обмежуватися одним алгоритмом і порівняти результати з точки зору як статистичної якості, так і економічної інтерпретованості. Порівняльну характеристику методів кластерного аналізу, використаних у дослідженні, наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика методів кластерного аналізу

Метод	Сутність методу	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
K-means	Поділяє об'єкти на заздалегідь задану кількість кластерів через мінімізацію відстані до центроїдів	Простий, швидкий, добре працює зі стандартизованими даними	Потрібно заздалегідь визначити кількість кластерів; чутливий до викидів	Доцільний як базовий метод кластеризації
BIRCH	Формує кластери через побудову ієрархічної структури кластерних ознак	Ефективний для великих наборів даних	Може гірше працювати зі складними формами кластерів	Доцільний як альтернативний метод перевірки
DBSCAN	Формує кластери на основі щільності розташування об'єктів	Виявляє нетипові об'єкти та шум	Чутливий до параметрів; частина країн може не потрапити до кластерів	Доцільний для пошуку аномальних країн
SOM	Самоорганізаційна карта Кохонена, яка поєднує кластеризацію та візуалізацію	Дозволяє бачити близькість країн і динаміку їхніх позицій	Потребує уважного налаштування та інтерпретації	Доцільна для візуального аналізу багатовимірних профілів

Джерело: розроблено автором

Порівняння, наведене в табл. 2.2, показує, що кожен із розглянутих методів має окреме призначення. K-means доцільно використовувати як базовий алгоритм кластеризації, BIRCH - як альтернативний ієрархічний підхід, DBSCAN - для виявлення нетипових і шумових спостережень, а карту Кохонена - для візуального

аналізу багатовимірних профілів країн. Тому подальше застосування кількох методів дозволяє порівняти стійкість та економічну інтерпретованість отриманого групування.

Метод K-means є одним із найпоширеніших алгоритмів кластеризації. Його суть полягає в тому, що країни розподіляються між K кластерами, а кожен кластер має власний центр - центроїд. Алгоритм ітеративно змінює належність об'єктів до кластерів так, щоб мінімізувати суму квадратів відстаней між країнами та центроїдами відповідних кластерів. Цільова функція методу K-means має вигляд формули (2.3):

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2, \quad (2.3)$$

де J - цільова функція алгоритму K-means, що відображає суму квадратів відстаней об'єктів до центроїдів відповідних кластерів;

K - кількість кластерів;

C_k - k -й кластер;

x_i - вектор ознак i -го об'єкта,

μ_k - центроїд k -го кластера.

Перевагою K-means є простота, швидкість і зрозумілість інтерпретації результатів. Саме тому цей метод доцільно використовувати як базовий. Водночас він потребує попереднього вибору кількості кластерів і може бути чутливим до викидів. Тому результати K-means варто перевіряти за допомогою метрик якості кластеризації та порівнювати з іншими методами.

Для оцінювання якості кластеризації у роботі доцільно використовувати кілька метрик: коефіцієнт силуєту, індекс Калінського-Харабаша та індекс Девіса-Болдіна. Коефіцієнт силуєту показує, наскільки добре об'єкт відповідає своєму кластеру порівняно з найближчим іншим кластером. Його значення змінюється від -1 до 1 , а вищі значення свідчать про кращу якість кластеризації [44].

Індекс Калінського-Харабаша ґрунтується на співвідношенні між міжкластерною та внутрішньокластерною дисперсією. Чим вищим є значення

цього індексу, тим краще кластери відокремлені один від одного і тим компактнішими є групи всередині [45].

Індекс Девіса-Болдіна оцінює середню подібність кожного кластера з найбільш подібним до нього іншим кластером. На відміну від попередньої метрики, для цього індексу нижче значення свідчить про кращу якість кластеризації, оскільки воно означає меншу подібність між різними кластерами [46].

Крім окремого аналізу кожної метрики, у роботі доцільно використати узагальнений показник якості кластеризації. Це пояснюється тим, що коефіцієнт силуету, індекс Калінського-Харабаша та індекс Девіса-Болдіна мають різні шкали вимірювання і не можуть бути безпосередньо додані або усереднені без попереднього приведення до спільного масштабу. Крім того, напрям інтерпретації цих індикаторів є різним: для коефіцієнта силуету та індексу Калінського-Харабаша вищі значення свідчать про кращу якість кластеризації, тоді як для індексу Девіса-Болдіна кращим є нижче значення. Саме тому для комплексного порівняння результатів різних алгоритмів кластеризації та різної кількості кластерів використовується агрегований показник AV , запропонований у дослідженні С. Позняка та Ю. Коляди [43]. Агрегований показник AV розраховується за формулою (2.4):

$$AV = \frac{SC - \bar{SC}}{\sigma_{SC}} + \frac{CH - \bar{CH}}{\sigma_{CH}} - \frac{DBI - \bar{DBI}}{\sigma_{DBI}}, \quad (2.4)$$

де AV - агрегований показник якості кластеризації;

SC - значення коефіцієнта силуету для відповідного варіанта кластеризації;

$\bar{SC}$ - середнє значення коефіцієнта силуету серед усіх проведених експериментів;

σ_{SC} - стандартне відхилення коефіцієнта силуету;

CH - значення індексу Калінського-Харабаша;

$\bar{CH}$ - середнє значення індексу Калінського-Харабаша серед усіх експериментів;

σ_{CH} - стандартне відхилення індексу Калінського-Харабаша;

DBI - значення індексу Девіса-Болдіна;

$\bar{DBI}$ - середнє значення індексу Девіса-Болдіна серед усіх експериментів;

σ_{DBI} - стандартне відхилення індексу Девіса-Болдіна.

Зміст цього показника полягає в тому, що кожна метрика попередньо стандартизується, тобто порівнюється із середнім значенням та стандартним відхиленням за всіма варіантами кластеризації. Завдяки цьому показники, які мають різні одиниці вимірювання та різні масштаби, приводяться до порівнюваного вигляду. Додатні складові для SC та CH означають, що зростання цих показників підвищує загальну оцінку якості кластеризації. Від'ємний знак перед складовою DBI пояснюється тим, що для індексу Девіса-Болдіна нижче значення є кращим результатом.

Таким чином, чим вищим є значення агрегованого показника AV, тим кращим вважається відповідний варіант кластеризації з погляду сукупної оцінки трьох метрик. Використання цього показника дозволяє не обмежуватися аналізом окремих індексів, які можуть давати різні висновки, а порівнювати алгоритми кластеризації на основі єдиного узагальненого критерію. У межах цієї роботи агрегований показник AV може використовуватися для вибору найкращої кількості кластерів та порівняння результатів, отриманих за допомогою різних методів кластерного аналізу.

Попри зручність агрегованого показника AV, формальні метрики не повинні бути єдиним критерієм вибору методу кластеризації. Для економічного дослідження важливо, щоб отримані кластери мали змістовну інтерпретацію. Якщо алгоритм дає статистично прийнятні, але економічно нелогічні групи країн, такі результати потребують перегляду. Тому у цій роботі якість кластеризації оцінюється за двома критеріями: статистичними метриками та економічною інтерпретованістю отриманих кластерів.

Особливу увагу в контексті цієї роботи можна приділити самоорганізаційним картам Кохонена. Їхня перевага полягає в тому, що вони не лише групують країни, а й дозволяють візуально відобразити їхнє положення на двовимірній карті. Це корисно для аналізу динаміки, оскільки можна простежити, як змінюється положення країни в часі відносно інших країн. У прикладному дослідженні моделювання CO₂ за допомогою SOM підкреслюється, що країни з

найкращими та найгіршими характеристиками розташовуються в протилежних частинах карти, а рух країни по карті може інтерпретуватися як зміна її профілю декарбонізації [40].

Таким чином, кластерний аналіз є доцільним методом для дослідження енергетичного розвитку країн світу. Він дозволяє перейти від аналізу окремих показників до виявлення типових моделей розвитку. У поєднанні зі стандартизацією, кореляційним аналізом дає змогу сформувати групи країн зі схожими економіко-енергетичними та екологічними характеристиками.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН СВІТУ ТА ФОРМУВАННЯ ПОЛІТИК ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

3.1 Порівняльне оцінювання методів кластеризації країн

3.1.1 Кластеризація країн методом K-means

На першому етапі практичного моделювання було застосовано метод K-means. Цей метод є одним із базових алгоритмів кластеризації та передбачає поділ спостережень на заздалегідь задану кількість кластерів. У межах дослідження перевірялися варіанти з кількістю кластерів від 3 до 8. Для кожного варіанта було розраховано коефіцієнт силуету, індекс Калінського - Харабаса, індекс Девіса - Болдіна та показник інерції. На основі стандартизованих значень перших трьох метрик додатково визначено агрегований показник AV. Результати оцінювання якості кластеризації методом K-means за різної кількості кластерів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати оцінювання якості кластеризації методом K-means за різної кількості кластерів

Кількість кластерів	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	Інерція	AV
3	0.22	164.98	1.45	8875.59	-4.30
4	0.26	182.09	1.32	7351.35	1.97
5	0.23	179.20	1.36	6471.90	-0.27
6	0.23	177.18	1.34	5783.85	-0.87
7	0.24	176.05	1.22	5222.62	0.85
8	0.26	174.18	1.12	4777.97	2.63

Джерело: розроблено автором

Дані табл. 3.1 свідчать, що окремі метрики по-різному визначають найкращу кількість кластерів. Індекс Калінського - Харабаша надає перевагу поділу на 4 кластери, тоді як індекс Девіса - Болдіна та агрегований показник AV - поділу на 8 кластерів. Для додаткової візуальної оцінки зміни внутрішньокластерної варіації використано метод ліктя, результати якого наведено на рис. 3.1.

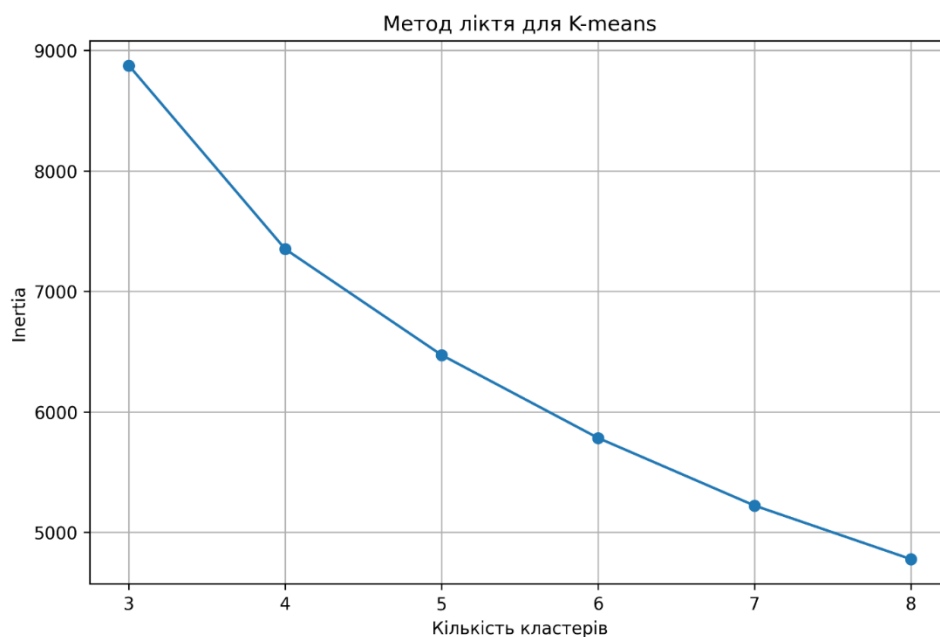


Рисунок 3.1 Метод ліктя для визначення кількості кластерів K-means

Джерело: розроблено автором

Як видно з рис. 3.1, найбільше зменшення показника інерції спостерігається при переході від 3 до 4 кластерів: з 8875,59 до 7351,35. Надалі його значення продовжує знижуватися, однак крива набуває більш плавного характеру. Це дає підстави розглядати 4 кластери як один із можливих варіантів, проте метод ліктя не забезпечує однозначного вибору. Тому додатково проаналізовано динаміку коефіцієнта силуету, наведену на рис. 3.2.

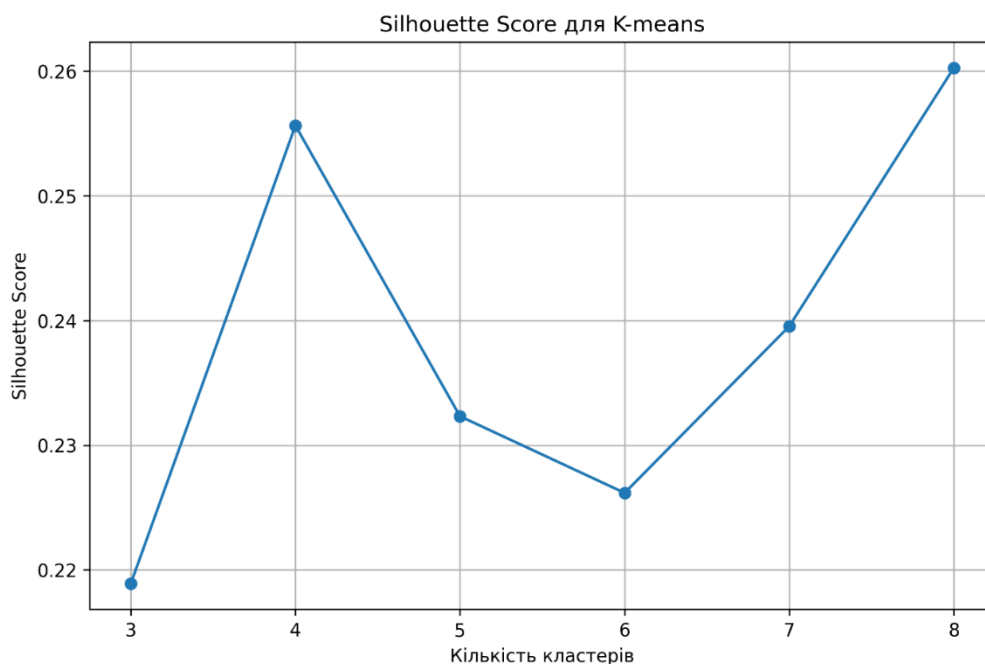


Рисунок 3.2 Значення коефіцієнта силуету для кластеризації методом K-means

Джерело: розроблено автором

Як видно з рис. 3.2, значення коефіцієнта силуету для методу K-means перебувають у межах від 0,22 до 0,26. Найнижче значення отримано при 3 кластерах - 0,22. Після округлення однакове найвище значення 0,26 мають варіанти з 4 та 8 кластерами, хоча на графіку результат для 8 кластерів є дещо вищим. Відносно невисокі значення показника свідчать про те, що кластери не є повністю відокремленими, а між енергетичними профілями країн існують поступові переходи. Такий результат є закономірним для багатовимірних економічних та енергетичних даних, оскільки окремі країни можуть одночасно поєднувати характеристики кількох моделей розвитку. Тому остаточний вибір кількості кластерів потребує врахування інших метрик якості та агрегованого показника AV.

Індекс Калінського-Харабаша має найвище значення при 4 кластерах - 182,09. Це свідчить про те, що за цим критерієм варіант із 4 кластерами забезпечує найкраще співвідношення між міжкластерною та внутрішньокластерною варіацією. Водночас при збільшенні кількості кластерів значення цього індексу

поступово зменшується, хоча залишається на досить близькому рівні. Наприклад, для 8 кластерів значення Калінського-Харабаша становить 174,18.

Індекс Девіса-Болдіна, навпаки, потрібно мінімізувати, оскільки менші значення свідчать про кращу відокремленість кластерів. За цим показником найкращий результат отримано при 8 кластерах, де значення індексу Девіса-Болдіна становить 1,12. Це означає, що при збільшенні кількості кластерів до 8 середня подібність між різними кластерами зменшується, тобто групи стають більш відокремленими.

Для узагальнення результатів було використано агрегований показник AV, який поєднує стандартизовані значення коефіцієнта силуєту, індекс Калінського-Харабаша та індекс Девіса-Болдіна. Найвище значення AV отримано при 8 кластерах і воно становить 2,63. Другий найкращий результат спостерігається при 4 кластерах - 1,97. Отже, за сукупною оцінкою трьох метрик оптимальним для методу K-means є варіант із 8 кластерами.

Після вибору оптимальної кількості кластерів було побудовано фінальну модель K-means із 8 кластерами. Розподіл спостережень за кластерами фінальної моделі K-means наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розподіл спостережень за кластерами K-means

Кластери K-means	Кількість спостережень
0	12
1	182
2	175
3	60
4	81
5	12
6	24
7	174

Джерело: розроблено автором

Розподіл спостережень між кластерами виявився нерівномірним. Найбільшими є кластер 1, до якого потрапило 182 спостереження, кластер 2 - 175 спостережень, та кластер 7 - 174 спостереження. Також відносно великим є кластер

4, який включає 81 спостереження, і кластер 3 із 60 спостереженнями. Натомість кластери 0 і 5 містять лише по 12 спостережень, а кластер 6 - 24 спостереження.

Такий розподіл свідчить про те, що більшість країн і років групуються у кілька великих кластерів, які відображають найбільш типові моделі енергетичного розвитку. Малі кластери, навпаки, можуть характеризувати специфічні або нетипові групи спостережень. Це можуть бути країни з особливо високими або низькими значеннями окремих енергетичних показників, наприклад із високим рівнем споживання енергії, значною роллю викопного палива, паливною експортною спеціалізацією або специфічною структурою електроенергетики.

Отже, метод K-means дозволив здійснити первинне групування країн за сукупністю енергетичних, економічних та екологічних показників. Формальні метрики показали, що найкращим за агрегованим показником AV є варіант із 8 кластерами. Водночас результати також свідчать, що кластери мають різний розмір, а частина груп є досить малими.

3.1.2 Кластеризація країн методом BIRCH

Наступним методом кластеризації, який було застосовано у дослідженні, є BIRCH. На відміну від K-means, цей алгоритм формує кластери на основі ієрархічної структури кластерних ознак. BIRCH добре підходить для роботи з великими наборами даних, оскільки спочатку узагальнює спостереження у компактну структуру, а потім виконує остаточне групування. У межах цього дослідження для методу BIRCH, як і для K-means, було перевірено різну кількість кластерів - від 3 до 8. Результати оцінювання якості кластеризації методом BIRCH за різної кількості кластерів наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати оцінювання якості кластеризації методом BIRCH за різної кількості кластерів

Кількість кластерів	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	AV
3	0.34	112.42	0.92	0.01
4	0.38	136.99	0.90	2.12
5	0.24	161.90	1.22	-1.44
6	0.24	148.64	1.09	-0.97
7	0.24	155.60	1.10	-0.65
8	0.26	158.47	0.95	0.92

Джерело: розроблено автором

Для кожного варіанта було розраховано коефіцієнт силуету, індекс Калінського-Харабаша, індекс Девіса-Болдіна, стандартизовані значення цих метрик та агрегований показник AV. За результатами таблиці видно, що найкраще значення коефіцієнта силуету отримано при 4 кластерах - 0,38. Це є вищим результатом, ніж у методі K-means, де максимальне значення коефіцієнта силуету становило 0,26. Отже, за коефіцієнтом силуету метод BIRCH забезпечив кращу компактність і відокремленість кластерів.

Індекс Девіса-Болдіна також показує найкращий результат при 4 кластерах, оскільки його значення становить 0,90. Оскільки для цього показника нижче значення є кращим, можна зробити висновок, що саме варіант із 4 кластерами забезпечує найменшу середню подібність між різними кластерами. Досить близьким є результат при 3 кластерах, де індекс Девіса-Болдіна дорівнює 0,92, однак коефіцієнт силуету у цьому випадку є нижчим і становить 0,34.

Водночас індекс Калінського-Харабаша має найвище значення при 5 кластерах - 161,90. Формально це означає, що за співвідношенням міжкластерної та внутрішньокластерної дисперсії варіант із 5 кластерами виглядає достатньо сильним. Проте інші метрики для цього варіанта є гіршими: коефіцієнт силуету знижується до 0,24, індекс Девіса-Болдіна зростає до 1,22, а агрегований показник AV має від'ємне значення -1,44. Тому варіант із 5 кластерами не можна вважати оптимальним за сукупністю критеріїв.

Для узагальненої оцінки результатів було використано агрегований показник AV. Найвище значення AV отримано при 4 кластерах - 2,12. Другим за якістю є варіант із 8 кластерами, де AV становить 0,92, однак цей результат суттєво

поступається варіанту з 4 кластерами. Отже, за сукупною оцінкою коефіцієнт силуєту, індекс Калінського-Харабаша та індекс Девіса-Болдіна оптимальною кількістю кластерів для методу BIRCH є 4. Розподіл спостережень за кластерами фінальної моделі BIRCH наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Розподіл спостережень за кластерами BIRCH

Кластери BIRCH	Кількість спостережень
0	612
1	72
2	12
3	24

Джерело: розроблено автором

Після вибору оптимальної кількості кластерів було побудовано фінальну модель BIRCH із 4 кластерами. Розподіл спостережень між кластерами виявився нерівномірним. Найбільший кластер 0 містить 612 спостережень, що становить основну частину вибірки. Кластер 1 включає 72 спостереження, кластер 2 - 12 спостережень, а кластер 3 - 24 спостереження.

Такий розподіл свідчить про те, що метод BIRCH виділив одну велику групу країн-рік із найбільш типовими характеристиками енергетичного розвитку, а також кілька менших кластерів, які можуть відображати специфічні або більш відмінні енергетичні профілі. Малі кластери можуть бути пов'язані з країнами, які мають нетипову структуру енергоспоживання, високий рівень залежності від окремих видів енергоресурсів, особливу роль паливного експорту або значні відмінності за рівнем розвитку низьковуглецевої енергетики.

Отже, метод BIRCH дозволив отримати достатньо якісне групування країн за енергетичними, економічними та екологічними показниками. Найкращим варіантом за сукупністю метрик є модель із 4 кластерами. Водночас наявність одного дуже великого кластера свідчить про те, що значна частина спостережень має подібні характеристики, тоді як менші кластери відображають більш специфічні моделі енергетичного розвитку. Це робить BIRCH корисним методом

для порівняння з K-means та подальшого вибору найбільш інтерпретованого підходу до кластеризації.

3.1.3 Кластеризація країн методом DBSCAN

Третім методом кластеризації, який було перевірено у межах дослідження, є DBSCAN. На відміну від K-means та BIRCH, цей алгоритм не потребує попереднього задання кількості кластерів, оскільки формує групи на основі щільності розташування спостережень у просторі ознак. Основна логіка DBSCAN полягає в тому, що спостереження, які мають достатню кількість сусідів у заданому радіусі, об'єднуються в кластери, тоді як об'єкти, що не належать до щільних областей, позначаються як шум. Саме здатність виявляти шумові або нетипові спостереження є однією з основних переваг DBSCAN [47].

У межах дослідження для DBSCAN було перевірено різні комбінації параметрів радіуса околу та мінімальної кількості зразків. Параметр радіуса околу визначає межі у яких алгоритм шукає сусідні спостереження, а мінімальна кількість зразків задає мінімальну кількість об'єктів, необхідну для формування щільної області. Водночас саме ці параметри є критичними для результатів DBSCAN. Якщо параметр радіуса околу є занадто малим, значна частина спостережень може бути віднесена до шуму. Якщо радіус околу є занадто великим, алгоритм може об'єднати більшість спостережень в один великий кластер. Тому DBSCAN є досить чутливим до вибору параметрів, що також відзначається у науковій літературі [48]. Результати підбору параметрів та оцінювання якості кластеризації методом DBSCAN наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати підбору параметрів та оцінювання якості кластеризації методом DBSCAN

Кількість кластерів	Параметр радіуса околу	Мінімальна кількість зразків	Кількість шумових спостережень	Частка найбільшого кластера	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	Скоригований бал
2	1.45	20	327	0.51	0.39	88.67	0.67	0.10
3	1.72	15	179	0.63	0.36	188.94	0.77	0.10
4	0.99	15	583	0.06	0.53	166.69	0.71	0.09
5	1.09	20	557	0.06	0.49	148.58	0.74	0.10
6	1.02	15	552	0.06	0.43	134.79	0.81	0.09
7	1.94	12	39	0.85	0.07	51.96	0.76	0.01
8	0.56	12	622	0.02	0.82	1155.82	0.26	0.11

Джерело: розроблено автором

За результатами підбору параметрів можна побачити, що формально найвище значення скоригованого балу отримано для варіанта з 8 кластерами, де параметр радіуса околу дорівнює 0,56, а мінімальна кількість зразків - 12. Однак цей результат не можна вважати придатним для подальшого аналізу, оскільки кількість шумових спостережень становить 622, тобто частка шуму дорівнює 86,39 %. Це означає, що переважна більшість спостережень не була віднесена до жодного змістовного кластера. Крім того, частка найбільшого кластера становить лише 1,94 %, що свідчить про надмірне дроблення даних і відсутність стабільної структури кластеризації.

Інші варіанти параметрів також не дали достатньо якісного результату. Наприклад, при 4 кластерах частка шуму становить 80,97 %, при 5 кластерах - 77,36 %, а при 6 кластерах - 76,67 %. Такі значення є надто високими для практичної інтерпретації, оскільки більшість спостережень типу “країна - рік” фактично виключаються з кластерного аналізу. У такій ситуації результати DBSCAN не дозволяють повноцінно порівнювати країни за енергетичними профілями, адже значна частина вибірки не потрапляє до жодної групи.

Найбільш збалансованим серед отриманих варіантів можна вважати модель із 3 кластерами, де радіус околу дорівнює 1,72, а мінімальна кількість зразків - 15. У цьому випадку кількість шумових спостережень становить 179, або 24,86 % вибірки. Це значно менше, ніж у варіантах із 4, 5, 6 або 8 кластерами, проте навіть

така частка шуму залишається досить високою. Майже чверть усіх спостережень не була включена до кластерів, що ускладнює змістовну інтерпретацію результатів і знижує придатність методу для основного аналізу. Розподіл спостережень за кластерами DBSCAN для найбільш збалансованого варіанта наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Розподіл спостережень за кластерами DBSCAN

Кластер DBSCAN	Назва кластера DBSCAN	Кількість спостережень	Частка спостережень %
-1	Шум	179	24.86
0	Кластер 0	456	63.33
1	Кластер 1	49	6.81
2	Кластер 2	36	5.00

Джерело: розроблено автором

Додатковою проблемою є нерівномірний розподіл спостережень між кластерами. У фінальному варіанті з 3 кластерами найбільший кластер містить 456 спостережень, тобто 63,33 % вибірки. Два інші кластери є значно меншими: кластер 1 включає 49 спостережень, або 6,81 %, а кластер 2 - лише 36 спостережень, або 5,00 %. Таким чином, DBSCAN фактично сформував один великий кластер, дві малі групи та значну кількість шумових спостережень.

Такий результат є проблемним з погляду дослідження енергетичного розвитку країн. Метою кластеризації є виділення груп країн зі схожими енергетичними, економічними та екологічними характеристиками. Однак у випадку DBSCAN значна частина спостережень або потрапляє в шум, або концентрується в одному великому кластері. Це не дозволяє отримати достатньо збалансовану й економічно інтерпретовану кластерну структуру. Фактично алгоритм не стільки розподіляє країни за різними моделями енергетичного розвитку, скільки відокремлює частину спостережень як нетипові.

Низька придатність DBSCAN у цьому дослідженні може пояснюватися специфікою даних. Енергетичні профілі країн формуються під впливом багатьох показників, між якими існують поступові переходи, а не чітко відокремлені щільні області. Крім того, країни суттєво відрізняються за масштабом економіки, рівнем енергоспоживання, структурою виробництва електроенергії, часткою відновлюваних джерел, вуглецевою інтенсивністю та залежністю від викопного

палива. За таких умов DBSCAN може сприймати багато спостережень як недостатньо щільні або нетипові, що й призводить до високої частки шуму.

Отже, попри те, що DBSCAN є корисним методом для виявлення аномальних або нетипових спостережень, у межах цього дослідження він виявився малопридатним для основної кластеризації країн. Велика кількість шумових спостережень, надмірна чутливість до параметрів радіуса околу і мінімальної кількості зразків, а також нерівномірний розподіл об'єктів між кластерами не дозволяють використовувати результати DBSCAN як основну основу для подальшої інтерпретації. Тому цей метод доцільно виключити з фінального порівняння якості кластеризації та використовувати лише як допоміжний інструмент для виявлення потенційно нетипових країн або років. Недоцільність застосування методу DBSCAN для кластеризації країн у сфері зеленої енергетики свідчить у тому числі дослідження [49].

3.1.4 Порівняння результатів кластеризації методами K-means та BIRCH

Після окремого оцінювання результатів кластеризації методами K-means, BIRCH та DBSCAN доцільно узагальнити отримані результати й визначити, який із методів забезпечує найкращу якість групування країн. Оскільки метод DBSCAN виявився менш придатним для основного аналізу, подальше порівняння здійснюється між методами K-means та BIRCH. У табл. 3.7 наведено результати порівняння цих методів за основними метриками якості кластеризації та агрегованим показником AV.

Таблиця 3.7 – Порівняння результатів кластеризації методами K-means та BIRCH за значенням агрегованого показника AV

Метод	Кількість кластерів	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	AV
K-means	8	0.26	174.18	1.12	2.63
BIRCH	4	0.38	136.99	0.90	2.12
K-means	4	0.26	182.09	1.32	1.97
BIRCH	8	0.26	158.47	0.95	0.92
K-means	7	0.24	176.05	1.22	0.85
BIRCH	3	0.34	112.42	0.92	0.01
K-means	5	0.23	179.20	1.36	-0.27
BIRCH	7	0.24	155.60	1.10	-0.65
K-means	6	0.23	177.18	1.34	-0.87
BIRCH	6	0.24	148.64	1.09	-0.97
BIRCH	5	0.24	161.90	1.22	-1.44
K-means	3	0.22	164.98	1.45	-4.30

Джерело: розроблено автором

За результатами порівняння методів кластеризації було встановлено, що найкращим варіантом є той, для якого значення агрегованого показника AV є найбільшим. Такий підхід відповідає методиці, використаній у статті, де якість кластеризації оцінювалася не за окремим показником, а за узагальненим критерієм, що поєднує коефіцієнт силуету, індекс Калінського-Харабаша та індекс Девіса-Болдіна.

У межах проведеного дослідження найвище значення AV отримано для методу K-means при кількості кластерів 8. Значення AV для цього варіанта становить 2.63, що є найбільшим серед усіх розглянутих комбінацій методів і кількості кластерів. Друге місце посідає метод BIRCH із 4 кластерами, для якого AV становить 2.12. Отже, хоча метод BIRCH також демонструє достатньо якісний результат, найефективнішим методом кластеризації у цьому дослідженні слід вважати K-means із поділом на 8 кластерів.

Водночас перевага K-means не означає, що цей метод забезпечив найкращий результат за кожною окремою метрикою. Для BIRCH із 4 кластерами отримано вищий коефіцієнт силуету та нижчий індекс Девіса - Болдіна, що свідчить про достатню компактність і відокремленість сформованих груп. Проте практичний розподіл спостережень показав, що BIRCH об'єднав 612 із 720 спостережень в один

домінуючий кластер, тоді як інші групи залишилися значно меншими. Така структура надмірно узагальнює основну частину країн і зменшує можливості для змістовного розмежування їхніх енергетичних профілів. K-means із 8 кластерами забезпечив детальніший розподіл спостережень і дозволив виділити як найбільш типові, так і специфічні моделі енергетичного розвитку. Отже, остаточний вибір методу ґрунтується не лише на максимальному значенні AV , а й на придатності отриманого групування для подальшої економічної інтерпретації.

3.2 Побудова та інтерпретація карти Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики

Після порівняння класичних методів кластеризації доцільно перейти до побудови самоорганізаційної карти Кохонена. На відміну від K-means, BIRCH та DBSCAN, карта Кохонена не лише групує об'єкти, а й відображає їх на двовимірній площині. Це дозволяє візуально оцінити близькість країн між собою, простежити їхнє положення у просторі ознак, а також побачити зміну енергетичного профілю окремих країн у часі. У контексті цієї роботи карта Кохонена є особливо корисною, оскільки дослідження охоплює багатовимірну систему показників, пов'язаних із розвитком відновлюваної енергетики, низьковуглецевої електроенергетики, вуглецевої інтенсивності та енергоефективності.

Перша карта Кохонена була побудована саме для аналізу розвитку зеленої енергетики. Її основний зміст полягає не в оцінці загальної структури споживання всіх енергоресурсів, а у виявленні того, наскільки країни просунулися в напрямі відновлюваної та низьковуглецевої моделі енергетичного розвитку. Тому при інтерпретації цієї карти основну увагу було приділено таким показникам, як частка електроенергії з відновлюваних джерел, частка електроенергії з низьковуглецевих джерел, частка електроенергії з сонця та вітру, споживання енергії з відновлюваних

джерел, альтернативна та ядерна енергетика, вуглецева інтенсивність економіки, рівень енергоємності первинної енергії та ВВП на душу населення.

Використання карти Кохонена для такого завдання є доцільним, оскільки карта Кохонена дозволяє зберегти топологічну близькість об'єктів: країни зі схожими характеристиками розміщуються ближче одна до одної, а країни з відмінними профілями - у більш віддалених частинах карти. У дослідженнях із використанням SOM для аналізу скорочення викидів CO₂ також підкреслюється, що положення країни на карті можна інтерпретувати як її багатовимірний профіль, а переміщення країни по карті в часі - як зміну її моделі декарбонізації [40].

Для вибору оптимальної кількості кластерів на карті Кохонена було розраховано кілька метрик якості кластеризації: коефіцієнт силуету, індекс Калінського-Харабаша, індекс Девіса-Болдіна, а також стандартизовані значення цих показників і агрегований показник AV. Результати наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати вибору кількості кластерів для карти Кохонена за показниками розвитку зеленої енергетики

Кількість кластерів	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	AV
3	0.19	22.71	1.55	-2.47
4	0.20	21.88	1.34	-1.37
5	0.21	22.62	1.19	1.99
6	0.22	22.98	1.19	3.55
7	0.20	22.37	1.14	0.76
8	0.19	22.24	1.26	-1.23
9	0.20	21.71	1.22	-1.21

Джерело: розроблено автором

За результатами табл. 3.8 можна побачити, що значення коефіцієнта силуету для різної кількості кластерів змінюється у межах від 0,19 до 0,22. Найвище значення цього показника отримано при 6 кластерах - 0,22. Хоча саме значення коефіцієнта силуету не є високим, це є типовим для багатовимірних соціально-економічних та енергетичних даних, де групи країн часто мають поступові переходи, а не жорстко відокремлені межі. У випадку енергетичного розвитку країни можуть одночасно мати ознаки кількох моделей: наприклад, високу частку

відновлюваної електроенергії, але водночас значне споживання викопного палива або високу енергоємність економіки.

Індекс Калінського-Харабаша також має найвище значення при 6 кластерах - 22,98. Це означає, що саме такий варіант забезпечує найкраще співвідношення між відмінностями між кластерами та компактністю об'єктів усередині кластерів. Для 3 кластерів значення цього індексу становить 22,71, а для 5 кластерів - 22,62, тобто ці варіанти також є близькими, однак поступаються варіанту з 6 кластерами.

Індекс Девіса-Болдіна має найнижче значення при 7 кластерах - 1,14, що формально є найкращим результатом за цією окремою метрикою. Проте для 6 кластерів значення індексу Девіса-Болдіна становить 1,19, що є дуже близьким до найкращого варіанта. Водночас при 6 кластерах значення коефіцієнту силуету і індекс Калінського-Харабаша є вищими, ніж при 7 кластерах. Тому лише за індексом Девіса-Болдіна не можна обирати остаточну кількість кластерів.

Для комплексної оцінки було використано агрегований показник AV. Найвище значення AV отримано при 6 кластерах - 3,55. Другий результат має варіант із 5 кластерами, де AV становить 1,99, однак він суттєво поступається варіанту з 6 кластерами. Отже, для карти Кохонена, що характеризує розвиток зеленої енергетики, оптимальною було обрано кластеризацію на 6 кластерів.

На рис. 3.3 наведено карту Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики. Кожен шестикутник на карті відповідає окремому нейрону SOM. Країни, які мають подібні значення показників, розташовуються в близьких або сусідніх нейронах. Колір фону відображає належність нейрона до певного SOM-кластера. Таким чином, карта дозволяє одночасно побачити як розміщення країн, так і більші узагальнені групи, які характеризують різні типи розвитку зеленої енергетики.

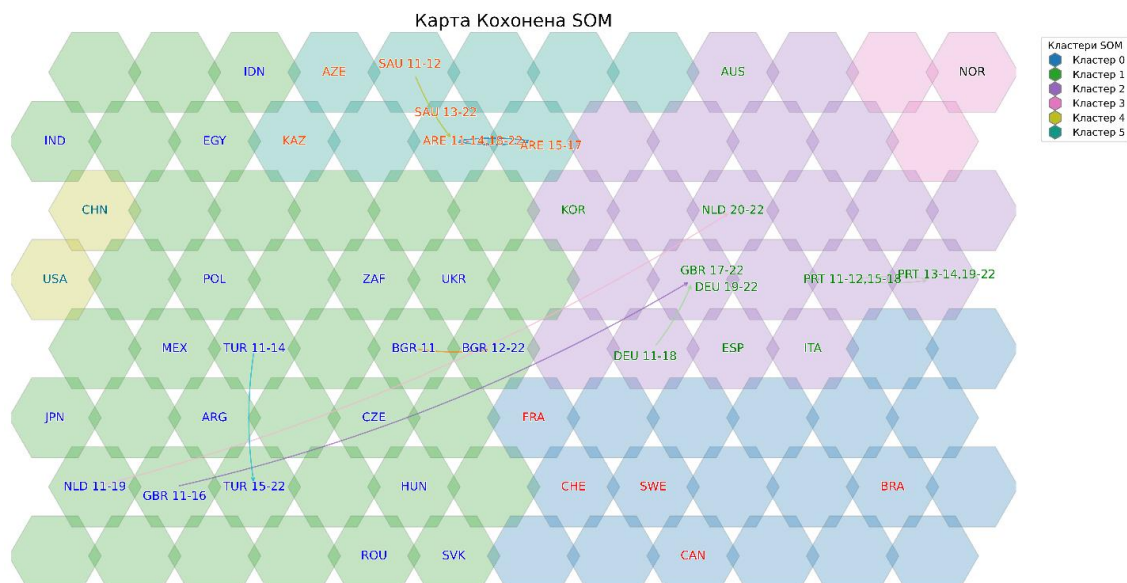


Рисунок 2.3 Карта Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики країн світу

Джерело: розроблено автором

Особливістю побудованої карти є те, що частина країн позначена не одним роком, а інтервалом років. Наприклад, підпис на зразок “NLD 11–19” означає, що Нідерланди у 2011–2019 рр. перебували в одному й тому самому нейроні карти. Якщо країна має кілька підписів у різних частинах карти, це означає, що її енергетичний профіль змінювався в часі. Стрілки на карті відображають напрям такого переміщення. Отже, карта Кохонена дозволяє аналізувати не лише статичну подібність країн, а й динаміку їхнього переходу між різними енергетичними профілями.

Кластер 0 можна охарактеризувати як групу країн із відносно розвиненою низьковуглецевою енергетикою та помітною роллю чистіших джерел електроенергії. На карті до цієї зони тяжіють країни, для яких характерна вища роль низьковуглецевих джерел, зокрема атомної, гідроенергетики або відновлюваної генерації. У цій частині карти розташовані, зокрема, Франція, Швейцарія, Швеція, Канада та Бразилія. Такі країни не завжди мають однакову структуру енергетики, однак їх об'єднує те, що вони мають нижчу залежність електроенергетики від викопного палива порівняно з країнами, де домінують вугілля, газ або нафта. Наприклад, для Франції важливою є роль атомної енергетики, для Швеції та Канади

- значення гідроенергетики та інших низьковуглецевих джерел, а для Бразилії - значна роль відновлюваних джерел в електроенергетиці. Тому цей кластер можна інтерпретувати як кластер країн із більш сприятливим профілем низьковуглецевого розвитку.

Кластер 1 є найбільш широким і неоднорідним. До нього потрапляє значна кількість країн, які мають перехідний або недостатньо сформований профіль зеленої енергетики. На карті в цій зоні розташовані Індія, Єгипет, Польща, ПАР, Україна, Мексика, Туреччина, Аргентина, Чехія, Угорщина, Румунія, Словаччина та частина траєкторії Болгарії. Для цих країн характерним є те, що розвиток відновлюваної або низьковуглецевої енергетики часто поєднується зі збереженням істотної ролі традиційних енергоресурсів. Частина країн цього кластера має високий рівень залежності від викопного палива, інша частина перебуває на етапі поступового переходу до чистіших джерел. Тому цей кластер доцільно трактувати як групу країн із перехідною або змішаною моделлю зеленого розвитку. Він не означає повну відсутність розвитку ВДЕ, але показує, що зелена енергетика ще не стала домінуючою характеристикою їхнього енергетичного профілю.

Кластер 2 можна інтерпретувати як групу економічно розвинених або відносно розвинених країн із активнішим просуванням у напрямі зеленої та низьковуглецевої енергетики. На карті до цієї зони тяжіють Нідерланди, Німеччина, Велика Британія, Іспанія, Італія, Португалія, а також Республіка Корея. Цей кластер відображає країни, де відбувається активна модернізація електроенергетики та зростання ролі низьковуглецевих джерел. Особливо важливою для цього кластера є динаміка: частина країн не одразу перебуває в цій зоні, а поступово переміщується до неї у пізніші роки. Це свідчить про зміну їхнього енергетичного профілю та посилення ознак зеленого переходу. У порівнянні з кластером 1, цей кластер має більш виражені риси декарбонізації та вищий рівень розвитку чистої електроенергетики.

Кластер 3 представлений лише однією країною - Норвегією, тому його доцільно трактувати не як широку групу країн, а як окремий специфічний енергетичний профіль. Відокремлення Норвегії в самостійний кластер свідчить про

те, що її характеристики розвитку зеленої та низьковуглецевої енергетики суттєво відрізняються від інших країн вибірки. Насамперед це можна пояснити високою роллю відновлюваних і низьковуглецевих джерел у виробництві електроенергії, зокрема гідроенергетики, а також відносно низьким рівнем вуглецевої інтенсивності електроенергетичного сектору. Водночас Норвегія має високий рівень економічного розвитку та значний рівень електрифікації, що додатково відрізняє її від країн із перехідною або викопно-паливною моделлю енергетики. Отже, кластер 3 можна інтерпретувати як окремий кластер країни з високорозвиненим низьковуглецевим енергетичним профілем.

Кластер 4 можна розглядати як групу великих енергетичних систем, для яких характерне поєднання значного масштабу енергоспоживання з поступовим розвитком відновлюваної енергетики. На карті до цієї зони тяжіють США та Китай. Для цих країн характерні великі абсолютні масштаби виробництва та споживання енергії, а також значна роль як традиційної, так і нової енергетики. З одного боку, США та Китай активно розвивають відновлювану енергетику, зокрема сонячну та вітрову генерацію. З іншого боку, через великий масштаб економіки та значну роль викопного палива їхній енергетичний профіль не можна ототожнювати з профілем країн, де низьковуглецева електроенергетика вже домінує. Отже, цей кластер характеризує великі економіки зі змішаним профілем зеленого переходу: потенціал і темпи розвитку ВДЕ є значними, але водночас зберігається суттєве енергетичне та вуглецеве навантаження.

Кластер 5 можна охарактеризувати як групу країн із сильнішою залежністю від викопного палива або паливно-ресурсною спеціалізацією. На карті до цієї зони належать Азербайджан, Казахстан, Саудівська Аравія та Об'єднані Арабські Емірати. Для цих країн важливу роль відіграють вуглеводневі ресурси, паливний експорт або традиційна енергетична модель. З погляду розвитку зеленої енергетики цей кластер є менш сприятливим, оскільки країни мають нижчий рівень переходу до відновлюваної та низьковуглецевої енергетики порівняно з країнами Європи або країнами з високою часткою гідро- чи атомної генерації.

Отримане розташування країн на карті Кохонена можна вважати логічним, оскільки воно узгоджується з результатами дослідження А. Матвійчука, О. Житкевич та Н. Осадчої, у якому самоорганізаційні карти також застосовувалися для аналізу декарбонізації країн. Зокрема, у статті Норвегія та Швеція належать до групи країн із сильнішими низьковуглецевими характеристиками, що відповідає результатам цієї роботи: Норвегія виділена в окремий кластер 3, а Швеція розташована в зоні країн із розвиненою низьковуглецевою енергетикою. Також логічним є виділення США та Китаю в окремий кластер 4, оскільки обидві країни мають великі масштаби енергоспоживання, значний економічний потенціал і водночас суттєве вуглецеве навантаження [40].

Нідерланди на карті мають помітне переміщення від положення “NLD 11–19” до положення “NLD 20–22”. Це означає, що у 2020–2022 рр. енергетичний профіль країни змінився настільки, що вона перейшла до іншої зони карти. Таке переміщення можна інтерпретувати як посилення ознак зеленого переходу, зокрема зростання ролі відновлюваної електроенергетики та поступову зміну структури генерації. Важливо, що Нідерланди переміщуються ближче до групи країн, які мають більш виражені характеристики низьковуглецевого розвитку.

Велика Британія також демонструє помітну динаміку. На карті відокремлено період “GBR 11–16” та період “GBR 17–22”. Це свідчить про зміну енергетичного профілю після 2016 року. Переміщення Великої Британії у напрямі кластера з більш розвиненою зеленою енергетикою можна пояснювати поступовим скороченням ролі вугілля в електроенергетиці та зростанням ролі відновлюваних джерел, насамперед вітрової генерації. У межах карти це відображається як перехід від менш “зеленого” профілю до зони, де розташовані країни з активнішою декарбонізацією електроенергетики.

Німеччина на карті представлена двома періодами: “DEU 11–18” і “DEU 19–22”. Це показує, що у пізніший період країна змінила своє положення у просторі ознак. Переміщення Німеччини є логічним, оскільки її енергетична політика протягом останніх десятиліть була пов’язана з активним розвитком відновлюваної енергетики. Водночас Німеччина не переходить до умовного кластера країн із

повністю низьковуглецевою електроенергетикою, оскільки в її енергетичній системі тривалий час зберігалася роль викопного палива. Тому її положення на карті можна інтерпретувати як приклад перехідної, але досить активної моделі зеленого енергетичного розвитку.

Португалія на карті має два положення: “PRT 11–12, 15–18” та “PRT 13–14, 19–22”. Це означає, що країна частково переміщувалася між близькими нейронами, але загалом залишалася в зоні, пов’язаній із відносно високою роллю відновлюваної енергетики. На відміну від країн, які демонструють різке переміщення між віддаленими зонами карти, динаміка Португалії є більш локальною. Це може свідчити не про радикальну зміну енергетичної моделі, а про коливання всередині вже сформованого профілю країни з достатньо помітною роллю ВДЕ.

Для країн, які не мають помітних стрілок або зміни положення на карті, можна говорити про відносну стабільність енергетичного профілю протягом 2011–2022 рр. Наприклад, Норвегія розташовується в окремій зоні карти, що відображає її специфічний низьковуглецевий профіль. Швеція, Швейцарія, Франція та Канада також займають відносно стабільні позиції в зоні країн із розвиненішою низьковуглецевою електроенергетикою. Водночас країни на зразок Польщі, ПАР або України залишаються ближче до перехідної частини карти, що свідчить про складність швидкого переходу до зеленої моделі за умов значної ролі традиційної енергетики або структурних обмежень економіки.

На рис. 3.4 наведено теплову карту, побудованої карти Кохонена. Цей графік є важливим доповненням до самої карти, оскільки він показує не просто розташування країн, а відстані між сусідніми нейронами. Якщо між нейронами спостерігається більша відстань, це означає, що профілі країн у цих частинах карти суттєво відрізняються. Якщо відстань є меншою, то сусідні нейрони мають більш подібні характеристики.

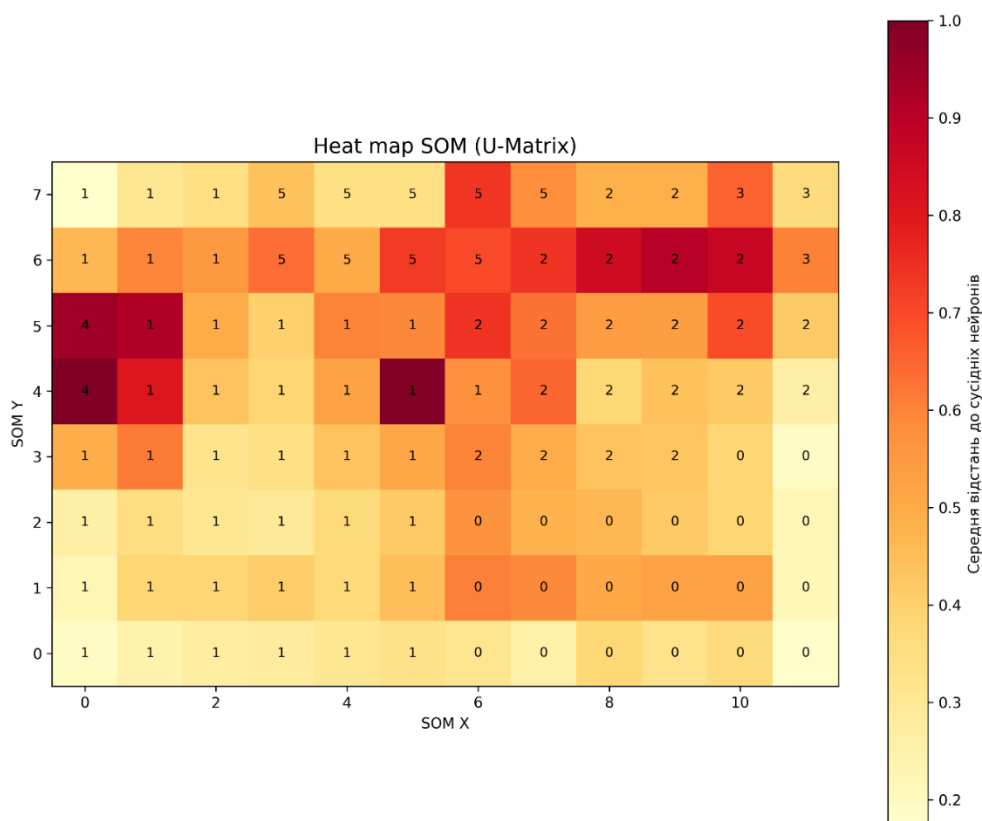


Рисунок 3.4 Теплова карта відстаней між нейронами карти Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики

Джерело: розроблено автором

Інтерпретуючи теплову карту, потрібно враховувати, що візуальна близькість країн на карті не завжди означає повну подібність їхніх енергетичних профілів. Якщо між двома сусідніми нейронами проходить зона з високою відстанню, це означає, що між ними існує змістовна межа. Тому теплова карта дозволяє пояснити ситуації, коли країни на двовимірній карті розташовані відносно близько, але фактично належать до різних енергетичних моделей. Для аналізу зеленої енергетики це особливо важливо, оскільки країни можуть бути близькими за одним показником, наприклад за рівнем ВВП або електроспоживання, але суттєво відрізнятися за часткою відновлюваної електроенергії або вуглецевою інтенсивністю.

На рис. 3.5 зображені профілі SOM-кластерів у стандартизованих значеннях. Такий графік показує, за рахунок яких саме показників кластери відрізняються один від одного. Якщо значення показника для кластера вище нуля,

це означає, що середній рівень цього показника в кластері є вищим за середній рівень по вибірці. Якщо значення нижче нуля, то показник є нижчим за середній. Саме цей графік є ключовим для змістовної інтерпретації кластерів, оскільки карта показує розташування країн, а профіль кластерів пояснює, чому країни потрапили саме до відповідних груп.

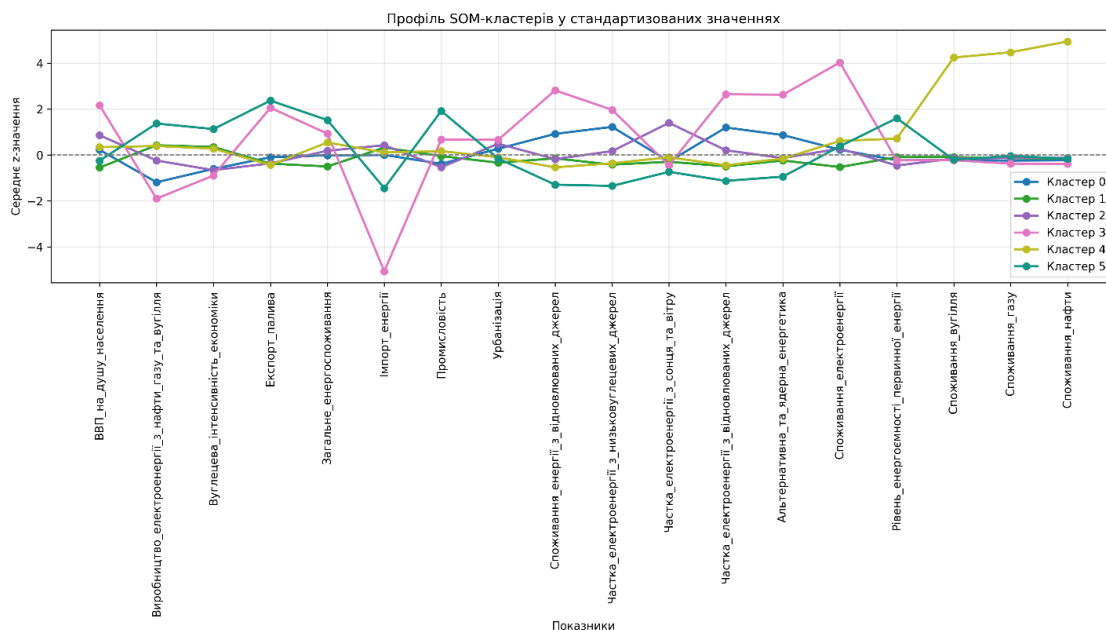


Рисунок 3.5 Профілі кластерів карти Кохонена за показниками розвитку зеленої енергетики у стандартизованих значеннях

Джерело: розроблено автором

Для карти розвитку зеленої енергетики особливо важливо звертати увагу на такі змінні: частка електроенергії з відновлюваних джерел, частка електроенергії з низьковуглецевих джерел, частка електроенергії з сонця та вітру, споживання енергії з відновлюваних джерел, альтернативна та ядерна енергетика, вуглецева інтенсивність та енергоємність. Кластери, у яких значення показників ВДЕ та низьковуглецевої електроенергії є вищими за середні, а вуглецева інтенсивність і енергоємність нижчими, можна інтерпретувати як більш “зелені”. Натомість кластери з нижчою часткою ВДЕ та вищою вуглецевою інтенсивністю відображають менш сприятливий профіль зеленого розвитку.

Таким чином, перша карта Кохонена дозволяє виділити кілька типів країн за рівнем розвитку зеленої енергетики. Перший тип - це країни з більш розвинутою

низьковуглецевою електроенергетикою, до яких належать Франція, Швеція, Швейцарія, Канада, Норвегія. Другий тип - це країни з активною перехідною моделлю зеленого розвитку, серед яких можна виділити Німеччину, Велику Британію, Нідерланди, Іспанію, Італію та Португалію. Третій тип - це країни з перехідним або змішаним профілем, де розвиток ВДЕ ще поєднується зі значною роллю традиційної енергетики: Україна, Польща, Туреччина, Мексика, Індія, ПАР, Єгипет та інші. Четвертий тип - це великі енергетичні системи, такі як США та Китай, де розвиток відновлюваної енергетики є масштабним, але через загальний розмір економіки та роль викопного палива профіль залишається змішаним. П'ятий тип - це країни з паливно-ресурсною спеціалізацією, такі як Саудівська Аравія, ОАЕ, Казахстан та Азербайджан.

Отримані результати узгоджуються з сучасним розумінням енергетичного переходу як неоднорідного процесу. У звітах IRENA підкреслюється, що глобальний енергетичний перехід потребує не лише збільшення частки ВДЕ, а й системної трансформації енергетичної інфраструктури, електрифікації, підвищення енергоефективності та скорочення вуглецевого навантаження [6]. Це означає, що країни не можуть оцінюватися лише за одним показником. Саме тому карта Кохонена є доречною для цього дослідження: вона дозволяє врахувати одночасно кілька характеристик і показати, що країни можуть мати різні траєкторії зеленого розвитку.

Варто також підкреслити, що положення країни на карті не є оцінкою “краща” або “гірша” у спрощеному розумінні. Воно показує подібність багатовимірного профілю. Наприклад, країна може мати високу частку відновлюваної електроенергії завдяки гідроенергетиці, але не обов'язково мати високий рівень розвитку сонячної та вітрової генерації. Інша країна може швидко нарощувати сонячну та вітрову генерацію, але все ще мати високу залежність від газу або вугілля. Тому карта Кохонена дозволяє уникнути надто спрощеного порівняння і показує більш комплексну картину зеленого енергетичного переходу.

Отже, побудована карта Кохонена для аналізу розвитку зеленої енергетики показала, що країни світу суттєво відрізняються за рівнем переходу до

відновлюваної та низьковуглецевої моделі енергетики. Оптимальною кількістю кластерів за агрегованим показником AV було визначено 6. На карті сформувалися групи країн із розвиненою низьковуглецевою енергетикою, країни з активною перехідною моделлю, країни зі змішаним профілем, великі енергетичні системи та країни з паливно-ресурсною спеціалізацією. Аналіз переміщення країн у 2011–2022 рр. показав, що частина держав, зокрема Нідерланди, Велика Британія, Німеччина та Португалія, поступово зміщуються в напрямі більш зеленого енергетичного профілю, тоді як країни з паливно-ресурсною спеціалізацією змінюються повільніше і залишаються ближчими до традиційної енергетичної моделі.

3.3 Побудова та інтерпретація карти Кохонена для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів

Друга карта Кохонена була побудована для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів. На відміну від попередньої карти, яка характеризувала розвиток зеленої та низьковуглецевої енергетики, ця карта показує, за рахунок яких джерел формується енергетична система країн. Основну увагу було приділено показникам виробництва електроенергії з нафти, газу та вугілля, загального енергоспоживання, споживання вугілля, газу та нафти, імпорту енергії, експорту палива, споживання електроенергії, частки промисловості у ВВП, рівня урбанізації та енергоемності первинної енергії. Результати вибору кількості кластерів для карти Кохонена за показниками структури виробництва та споживання енергоресурсів наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати вибору кількості кластерів для карти Кохонена за показниками структури виробництва та споживання енергоресурсів

Кількість кластерів	Коефіцієнт силуету	Індекс Калінського-Харабаша	Індекс Девіса-Болдіна	AV
3	0.39	32.18	0.96	3.73
4	0.33	34.65	1.04	3.29
5	0.23	33.00	1.15	-0.10
6	0.22	31.29	1.25	-2.30
7	0.24	30.70	1.15	-1.22
8	0.23	29.38	1.16	-2.04
9	0.23	28.68	1.06	-1.35

Джерело: розроблено автором

За результатами табл. 3.9 найвище значення агрегованого показника AV отримано при 3 кластерах - 3,73. Також для цього варіанта зафіксовано найвище значення коефіцієнта силуету - 0,39 та найнижче значення індексу Девіса-Болдіна - 0,96. Це свідчить про те, що з формального погляду найкращим є поділ карти Кохонена на 3 кластери. Водночас для змістовної економічної інтерпретації структури виробництва та споживання енергоресурсів трьох кластерів недостатньо, оскільки такий поділ надто узагальнює відмінності між країнами. Тому для подальшого аналізу було обрано варіант із 6 кластерами, який дозволяє детальніше розмежувати країни за типами енергетичних структур: збалансованою, перехідною, індустріальною, високоенергоспоживчою, викопно-паливною та паливно-ресурсною моделями.

На рис. 3.6 подано карту Кохонена для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів. Розташування країн на карті показує подібність їхніх енергетичних профілів. Країни, які знаходяться в одному або сусідніх нейронах, мають близьку структуру енергоспоживання або виробництва електроенергії. Якщо країна позначена кількома періодами або переміщується між нейронами, це свідчить про зміну її енергетичної структури протягом 2011–2022 рр.

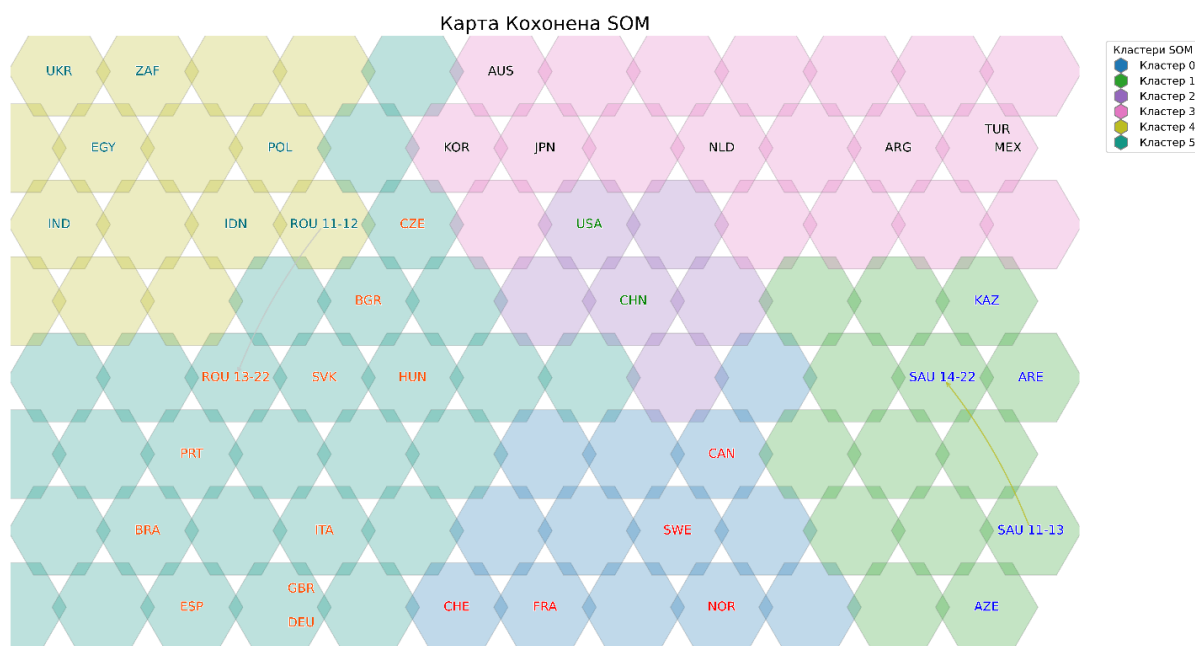


Рисунок 3.6 Карта Кохонена для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів

Джерело: розроблено автором

Кластер 0 можна охарактеризувати як групу країн із розвиненою низьковуглецевою та відносно диверсифікованою електроенергетикою. До цієї зони на карті належать Канада, Швеція, Швейцарія, Франція та Норвегія. Для цих країн характерна значна роль низьковуглецевих джерел у виробництві електроенергії, зокрема гідроенергетики, атомної енергетики або інших чистіших джерел. Специфіка цього кластера полягає саме у більш сприятливій структурі електроенергетики та нижчій залежності від викопного палива порівняно з країнами, де домінують вугілля, газ або нафта.

Кластер 1 відображає паливно-ресурсний тип енергетичної структури. До нього належать Казахстан, Об'єднані Арабські Емірати, Азербайджан та Саудівська Аравія. Для цих країн важливу роль відіграють видобуток, споживання або експорт паливних ресурсів, насамперед нафти й газу. Саме тому цей кластер найбільше пов'язаний із ресурсною спеціалізацією та традиційною енергетичною моделлю.

Кластер 2 можна інтерпретувати як кластер великих енергоспоживчих систем. На карті до нього належать США та Китай. Ці країни суттєво відрізняються

від інших масштабами економіки, обсягами виробництва та споживання енергії, а також значною роллю промисловості й великим загальним енергетичним навантаженням. Для них характерне поєднання традиційних джерел енергії з активним розвитком нових енергетичних технологій. Тому цей кластер не можна оцінювати лише як негативний: США та Китай мають високі абсолютні обсяги енергоспоживання, але водночас саме вони є одними з ключових учасників глобального енергетичного переходу.

Кластер 3 охоплює країни зі змішаною індустріально-урбанізованою структурою енергоспоживання. До цієї групи на карті належать Австралія, Республіка Корея, Японія, Нідерланди, Аргентина, Туреччина та Мексика. Для цих країн характерне поєднання значних енергетичних потреб, високого або середнього рівня урбанізації, промислового розвитку та використання різних джерел енергії. Цей кластер не є паливно-ресурсним у вузькому значенні, оскільки в ньому поєднуються країни з різними моделями енергетики. Його доцільніше трактувати як групу країн зі змішаним енергетичним профілем, де традиційні джерела енергії ще відіграють важливу роль, але структура енергоспоживання не є настільки однорідною, як у паливно-ресурсному кластері.

Кластер 4 можна охарактеризувати як групу країн із більш традиційною або викопно-паливною структурою енергоспоживання. До нього належать Україна, Південна Африка, Єгипет, Польща, Індія та Індонезія. Для цих країн характерною є помітна роль викопного палива, зокрема вугілля, газу або нафти, у виробництві та споживанні енергії. Частина країн цього кластера має значну роль промисловості або перебуває на етапі енергетичного переходу, однак їхня структура енергетики ще залишається більш традиційною порівняно з країнами, де вже сформована розвинена низьковуглецева електроенергетика. Тому цей кластер можна трактувати як викопно-паливний або вугільно-перехідний.

Кластер 5 відображає диверсифікований перехідний тип енергетичної структури. До нього належать Чехія, Румунія, Болгарія, Словаччина, Угорщина, Португалія, Бразилія, Іспанія, Італія, Велика Британія та Німеччина. Ці країни не утворюють паливно-ресурсну групу, оскільки для них не характерна чітко

виражена спеціалізація на експорті палива. Натомість вони мають змішану структуру енергоспоживання, у якій поєднуються традиційні джерела енергії, електроенергетика, поступовий розвиток відновлюваних джерел та різний рівень енергоефективності. Для багатьох країн цього кластера характерний поступовий перехід до чистішої енергетичної моделі, однак цей процес відбувається нерівномірно.

Отже, друга карта Кохонена показує не лише загальний рівень розвитку зеленої енергетики, а насамперед відмінності у структурі виробництва та споживання енергоресурсів. На ній чітко відокремлюються країни з розвиненою низьковуглецевою електроенергетикою, великі енергоспоживчі системи, паливно-ресурсні економіки, країни з традиційною викопно-паливною структурою та диверсифіковані перехідні енергетичні системи. Такий поділ дозволяє краще зрозуміти, що країни можуть мати подібний рівень економічного розвитку, але суттєво відрізнятися за джерелами енергії, масштабом споживання, роллю викопного палива та ступенем диверсифікації енергетичного балансу.

Окремо слід звернути увагу на переміщення країн на карті. Якщо країна змінює своє положення між нейронами, це означає, що протягом досліджуваного періоду змінилася структура її виробництва або споживання енергоресурсів. Наприклад, Саудівська Аравія має окремі положення для 2011–2013 рр. та 2014–2022 рр. Це свідчить про певну зміну її енергетичного профілю, однак загалом країна залишається близькою до паливно-ресурсної моделі. Тобто переміщення не означає повний перехід до іншого типу енергетичної системи, а радше відображає зміну всередині близького ресурсного профілю.

Румунія також має два положення на карті: для 2011–2012 рр. та для 2013–2022 рр. Це може свідчити про зміну структури енергоспоживання на початку досліджуваного періоду, після чого її положення стало стабільнішим. Подібні переміщення можуть бути пов'язані зі зміною ролі окремих видів палива, імпорту енергії, промислової структури або рівня енергоємності.

Для багатьох країн положення на карті залишається стабільним упродовж більшої частини періоду. Це означає, що їхня структура виробництва та

споживання енергоресурсів не змінювалася настільки сильно, щоб перейти до іншої частини карти. Наприклад, країни з паливною спеціалізацією можуть залишатися в близьких нейронах, якщо основа їхньої енергетичної моделі продовжує базуватися на нафті, газі або експорті палива. Аналогічно країни з більш диверсифікованою структурою можуть залишатися в межах перехідного кластера, якщо зміни відбуваються поступово.

На рис. 3.7 наведено теплову карту, або матрицю відстаней, для другої карти Кохонена, яка показує відстані між сусідніми нейронами. Вищі значення відстані означають суттєві відмінності між енергетичними профілями сусідніх груп країн, а нижчі значення - більшу подібність. Цей графік підтверджує, що країни з паливно-ресурсною спеціалізацією відокремлюються від країн із більш збалансованою структурою енергоспоживання. Також можна виділити зону великих енергетичних систем, які відрізняються масштабами споживання енергії та складнішою структурою використання ресурсів.

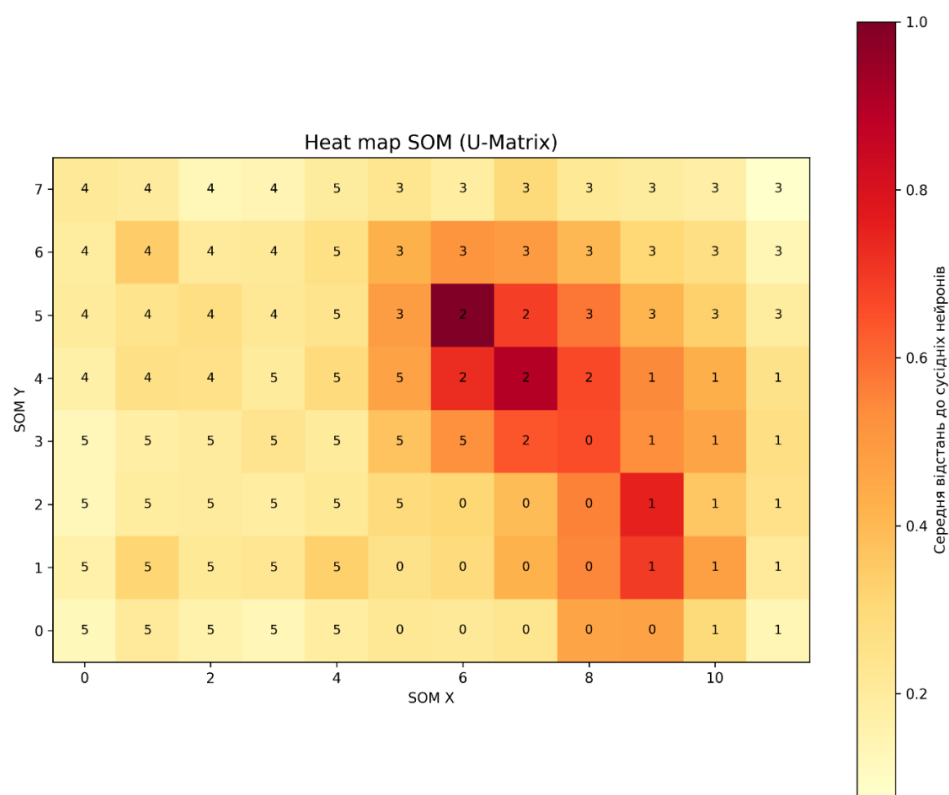


Рисунок 3.7 Теплова карта відстаней між нейронами карти Кохонена для аналізу структури виробництва та споживання енергоресурсів

Джерело: розроблено автором

На рис. 3.8 подано графік профілів кластерів карти Кохонена у стандартизованих значеннях, який дозволяє пояснити, за рахунок яких саме показників відрізняються кластери. Для другої карти найбільш важливими є споживання вугілля, газу та нафти, загальне енергоспоживання, споживання електроенергії, виробництво електроенергії з викопного палива, імпорту енергії, експорт палива та енергоємність.

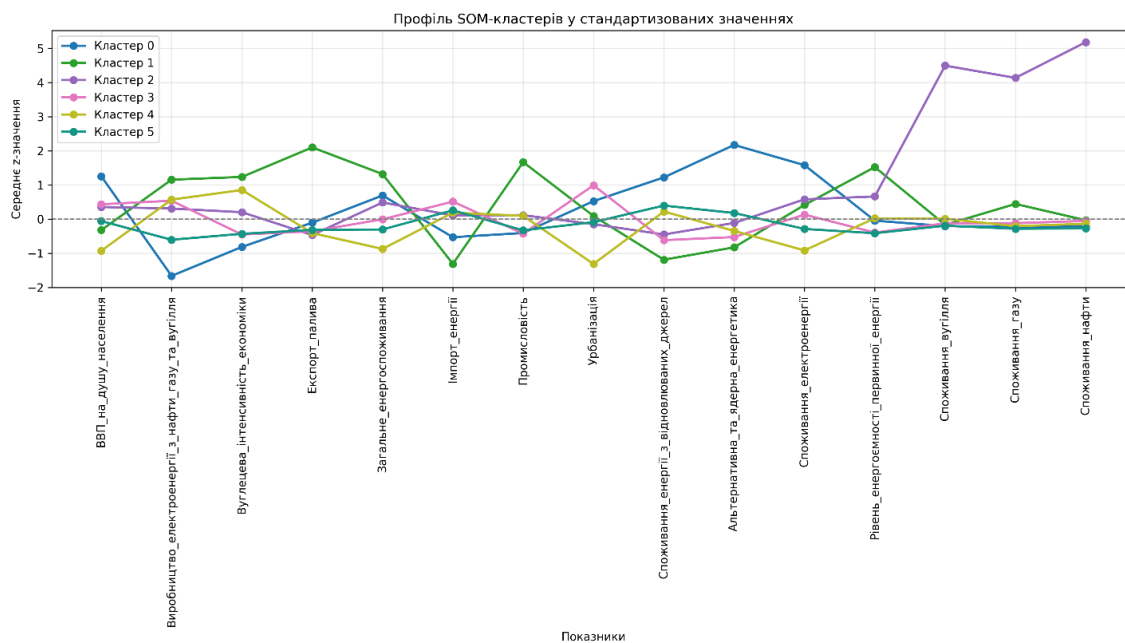


Рисунок 3.8 Профілі кластерів карти Кохонена за показниками структури виробництва та споживання енергоресурсів у стандартизованих значеннях

Джерело: розроблено автором

Профілі, наведені на рис. 3.8, підтверджують змістовні відмінності між виділеними групами. Для кластера 0 характерні вищі за середні значення ВВП на душу населення, споживання енергії з відновлюваних джерел, ролі альтернативної та ядерної енергетики, а також споживання електроенергії. Водночас частка електроенергії з викопного палива та вуглецева інтенсивність у цьому кластері є нижчими за середні. Це підтверджує його характеристику як групи країн із розвиненою та відносно диверсифікованою низьковуглецевою електроенергетикою.

Кластер 1 вирізняється високими значеннями експорту палива, загального енергоспоживання, частки промисловості та енергоємності первинної енергії. Таке

поєднання показників відповідає паливно-ресурсній моделі, у межах якої значну роль відіграють видобуток, внутрішнє використання та експорт енергоресурсів. Найбільш вираженою особливістю кластера 2 є значне перевищення середнього рівня споживання вугілля, газу та нафти. Це підтверджує виділення США та Китаю як великих енергоспоживчих систем, масштаби яких суттєво перевищують показники інших груп.

Кластер 3 має більш помірний профіль із відносно вищим рівнем урбанізації та без різкого домінування одного виду енергоресурсів, що відповідає змішаній індустріально-урбанізованій структурі. Для кластера 4 характерні нижчі за середні значення ВВП на душу населення й електроспоживання та вищий рівень вуглецевої інтенсивності, що підтверджує його викопно-паливний і перехідний характер. Показники кластера 5 переважно наближені до середніх значень і не демонструють настільки вираженої паливної спеціалізації. Це відповідає диверсифікованій перехідній моделі, у якій традиційні та відновлювані джерела енергії поступово поєднуються.

Отже, друга карта Кохонена дозволила виділити шість кластерів, які відображають кілька основних типів енергетичних структур країн. На відміну від першої карти, ця карта не показує безпосередньо рівень розвитку зеленої енергетики, а характеризує фактичну структуру виробництва та споживання енергоресурсів. Тому вона є важливим доповненням до попереднього аналізу, оскільки дозволяє розділити два різні аспекти: розвиток зеленої енергетики та ресурсну основу енергетичної системи країни.

3.4 Рекомендації щодо формування політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів

Проведене моделювання енергетичного розвитку країн світу показало, що держави суттєво відрізняються за рівнем розвитку відновлюваної енергетики, структурою енергоспоживання, залежністю від викопного палива, масштабами енергетичних систем та рівнем вуглецевої інтенсивності економіки. Тому політика впровадження відновлюваної енергетики не може бути однаковою для всіх країн. Універсальні рекомендації є недостатньо ефективними, оскільки країни мають різні стартові умови, фінансові можливості, структуру промисловості, рівень розвитку електромереж, залежність від імпорту або експорту палива та різний потенціал для використання сонячної, вітрової, гідроенергетики чи інших відновлюваних джерел.

Для країн кластера з розвиненою низьковуглецевою та диверсифікованою електроенергетикою, до яких належать Канада, Швеція, Швейцарія, Франція та Норвегія, основним завданням є не стільки початкове нарощування частки чистої енергетики, скільки подальше підвищення гнучкості та стійкості енергетичної системи. У цих країнах уже сформовано відносно сприятливий низьковуглецевий профіль, тому політика має бути спрямована на підтримку стабільності енергопостачання, інтеграцію нових відновлюваних потужностей, розвиток систем накопичення енергії та модернізацію електромереж. Важливим напрямом є також електрифікація транспорту, теплопостачання та окремих промислових процесів, оскільки це дозволяє поширити переваги низьковуглецевої електроенергетики на інші сектори економіки.

Для цієї групи країн доцільним є розвиток інтелектуальних електромереж, механізмів управління попитом, транскордонної торгівлі електроенергією та технологій довгострокового зберігання енергії. Оскільки частина таких країн має значну роль гідроенергетики або атомної енергетики, важливо забезпечити

збалансоване поєднання стабільних низьковуглецевих джерел із новими сонячними та вітровими потужностями. Для них актуальною є не лише кількісна мета збільшення ВДЕ, а й якісна модернізація енергосистеми, що дозволить уникати перевантаження мереж, втрат електроенергії та проблем із балансуванням.

Для паливно-ресурсного кластера, до якого належать Казахстан, Об'єднані Арабські Емірати, Азербайджан та Саудівська Аравія, ключовим завданням є поступова диверсифікація енергетичної та економічної моделі. Ці країни мають значну залежність від видобутку, споживання або експорту викопного палива, тому швидкий і різкий перехід до відновлюваної енергетики може бути економічно складним. Водночас саме такі країни мають високий потенціал для розвитку сонячної та вітрової генерації, а також фінансові ресурси, які можуть бути спрямовані на енергетичну трансформацію.

Для країн паливно-ресурсного кластера доцільно формувати політику поступового перенаправлення частини доходів від експорту викопного палива у розвиток відновлюваної енергетики, накопичувачів енергії, зеленого водню та модернізацію електромереж. Важливим інструментом можуть бути державні інвестиційні фонди, програми підтримки великих сонячних і вітрових проєктів, а також створення умов для залучення приватного капіталу. Для цієї групи країн важливо не лише будувати окремі об'єкти ВДЕ, а й зменшувати структурну залежність бюджету та економіки від викопних ресурсів. Тому політика впровадження ВДЕ має поєднуватися з ширшою політикою економічної диверсифікації.

Для кластера великих енергоспоживчих систем, до якого належать США та Китай, головною проблемою є масштаб енергетичного навантаження. Ці країни мають великі абсолютні обсяги виробництва та споживання енергії, значну роль промисловості та високий вплив на глобальні викиди. Водночас вони мають потужний технологічний, фінансовий та інноваційний потенціал для масштабного впровадження відновлюваної енергетики. Тому для цієї групи країн політика має бути спрямована не лише на збільшення встановленої потужності ВДЕ, а й на реальне скорочення частки викопного палива в енергобалансі.

Для США та Китаю доцільними є масштабні інвестиції у сонячну та вітрову генерацію, розвиток міжрегіональних електромереж, систем накопичення енергії, цифрове управління попитом та поступове виведення з експлуатації найбільш вуглецеємних потужностей. Важливим напрямом є також декарбонізація промисловості, оскільки саме промисловий сектор формує значну частину попиту на енергію. Для таких країн політика ВДЕ має бути пов'язана з промисловою політикою, розвитком чистих технологій, підтримкою виробництва обладнання для відновлюваної енергетики та стимулюванням енергоефективності у великих містах і промислових регіонах.

Для країн зі змішаною індустріально-урбанізованою структурою енергоспоживання, до яких належать Австралія, Республіка Корея, Японія, Нідерланди, Аргентина, Туреччина та Мексика, важливою є політика поступового заміщення традиційних джерел енергії без погіршення стабільності енергопостачання. Ці країни мають різні економічні умови, однак їх об'єднує поєднання значних енергетичних потреб, урбанізованої структури споживання та використання різних джерел енергії. Для них основним напрямом має бути посилення ролі відновлюваної електроенергетики у поєднанні з модернізацією мереж і розвитком технологій балансування.

Для цієї групи країн доцільно розвивати конкурентні механізми підтримки ВДЕ, зокрема аукціони на відновлювану генерацію, довгострокові контракти, податкові стимули та програми підтримки промислових споживачів, які переходять на чистішу електроенергію. Окрему увагу слід приділити розвитку морської вітрової енергетики для країн із відповідним географічним потенціалом, сонячної генерації для країн із високою інсоляцією та модернізації міської енергетичної інфраструктури. Для таких країн ефективною може бути політика поєднання централізованих великих проєктів ВДЕ із розвитком розподіленої генерації на рівні домогосподарств, громад і підприємств.

Для викопно-паливного або вугільно-перехідного кластера, до якого належать Україна, Південна Африка, Єгипет, Польща, Індія та Індонезія, головним завданням є зменшення залежності від традиційних джерел енергії, насамперед

вугілля, газу або нафти. Для цих країн швидкий перехід до ВДЕ може бути обмежений станом електромереж, структурою промисловості, соціальною залежністю окремих регіонів від традиційної енергетики та фінансовими можливостями. Тому політика впровадження ВДЕ має бути поступовою, але послідовною.

Для цієї групи країн першочерговими напрямками є модернізація електромереж, зниження втрат електроенергії, підвищення енергоефективності промисловості та житлово-комунального сектору, а також поступове заміщення найбільш вуглецеємних джерел генерації. Доцільним є розвиток розподіленої сонячної генерації, локальних енергетичних проєктів, біоенергетики там, де це відповідає ресурсному потенціалу, а також залучення міжнародного кліматичного фінансування. Для країн із високою роллю вугілля важливо поєднувати енергетичну політику з політикою справедливого переходу, яка передбачає підтримку регіонів, працівників і громад, залежних від вугільної промисловості.

Для України, яка входить до цієї групи, особливо важливими є розвиток децентралізованої генерації, підвищення стійкості енергетичної інфраструктури, підтримка сонячних і вітрових проєктів, модернізація мереж та інтеграція до європейського енергетичного простору. У зв'язку з безпековими ризиками для України важливе значення має не лише збільшення частки ВДЕ, а й формування більш розподіленої, гнучкої та стійкої енергосистеми. Це дозволить знизити залежність від великих централізованих об'єктів і підвищити надійність енергопостачання.

Для диверсифікованого перехідного кластера, до якого належать Чехія, Румунія, Болгарія, Словаччина, Угорщина, Португалія, Бразилія, Іспанія, Італія, Велика Британія та Німеччина, доцільно зосередитися на поглибленні вже наявної енергетичної трансформації. Ці країни мають змішану структуру енергоспоживання, однак для багатьох із них характерне поступове посилення ролі ВДЕ та скорочення залежності від традиційної генерації. Тому їхня політика має бути спрямована на прискорення інтеграції відновлюваних джерел у загальну енергетичну систему.

Для цього кластера важливими є розвиток накопичувачів енергії, міждержавних енергетичних з'єднань, гнучких ринків електроенергії, спрощення дозвільних процедур для будівництва об'єктів ВДЕ та стимулювання участі місцевих громад у виробництві чистої енергії. Для країн Європи особливо актуальним є поєднання політики ВДЕ з політикою енергоефективності будівель, електрифікації транспорту, декарбонізації промисловості та зменшення залежності від імпортованих викопних енергоносіїв. Для Бразилії важливо враховувати значну роль гідроенергетики й одночасно розвивати інші джерела відновлюваної енергії, щоб знизити ризики, пов'язані з кліматичними коливаннями та залежністю від водних ресурсів.

Загальним напрямом для всіх кластерів є необхідність поєднання розвитку відновлюваної енергетики з підвищенням енергоефективності. Саме по собі збільшення частки ВДЕ не гарантує зниження вуглецевої інтенсивності, якщо економіка залишається енергоємною, а загальний попит на енергію швидко зростає. Тому політика впровадження відновлюваної енергетики має супроводжуватися модернізацією промисловості, оновленням житлового фонду, розвитком енергоощадних технологій, скороченням втрат у мережах і стимулюванням раціонального споживання енергії.

Ще одним спільним напрямом є розвиток фінансових механізмів підтримки енергетичного переходу. Для країн із високим рівнем доходу це можуть бути зелені облігації, державні програми підтримки інновацій, податкові стимули та ринкові механізми ціноутворення на викиди. Для країн, що розвиваються, важливим є доступ до міжнародного кліматичного фінансування, пільгового кредитування, технологічної допомоги та механізмів страхування інвестиційних ризиків. Без стабільних фінансових інструментів розвиток ВДЕ може залишатися фрагментарним і залежним від окремих проєктів.

Важливо також враховувати інституційний аспект політики впровадження ВДЕ. Ефективний розвиток відновлюваної енергетики потребує стабільного законодавства, прозорих правил підключення до електромереж, прогнозованої тарифної політики, конкурентних механізмів відбору проєктів і захисту інвесторів.

Для країн перехідного та викопно-паливного типу особливо важливим є уникнення різких змін у регулюванні, оскільки нестабільність правил може зменшувати інвестиційну привабливість сектору ВДЕ.

Отже, результати кластерного аналізу та побудови карт Кохонена дають змогу сформулювати диференційований підхід до політики впровадження відновлюваної енергетики. Для країн із розвинутою низьковуглецевою енергетикою пріоритетом є підвищення гнучкості енергосистеми та поглиблення електрифікації. Для паливно-ресурсних країн важливою є диверсифікація економіки та перенаправлення доходів від викопного палива у чисті технології. Для великих енергоспоживчих систем ключовим є масштабне скорочення вуглецевого навантаження при збереженні стабільності енергопостачання. Для індустріально-урбанізованих країн актуальним є поєднання ВДЕ з модернізацією міської та промислової інфраструктури. Для викопно-паливних країн основним завданням є поступове скорочення залежності від традиційної генерації та справедливий енергетичний перехід. Для диверсифікованих перехідних країн важливо прискорити інтеграцію ВДЕ, розвивати накопичувачі енергії та посилювати енергоефективність. Такий підхід дозволяє врахувати специфіку кожної групи країн і зробити політику розвитку відновлюваної енергетики більш обґрунтованою та практично орієнтованою.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі було досліджено особливості моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу на основі показників енергоспоживання, структури виробництва електроенергії та вуглецевої інтенсивності економіки. Проведене дослідження підтвердило, що енергетичний розвиток є складним багатовимірним процесом, який не може бути оцінений лише за одним показником, наприклад часткою відновлюваних джерел енергії або загальним обсягом енергоспоживання. Для коректного міжкраїнового порівняння необхідно враховувати економічний рівень країни, структуру енергетичного балансу, залежність від викопного палива, рівень енергоефективності, розвиток низьковуглецевих джерел електроенергії та екологічну результативність економіки.

У теоретичній частині роботи було розкрито сутність енергетичного розвитку, його роль в економіці країни та зв'язок з екологізацією економічного розвитку. Встановлено, що енергетика є базовою умовою функціонування промисловості, транспорту, інфраструктури, сфери послуг і домогосподарств. Водночас сучасний енергетичний розвиток пов'язаний не лише зі збільшенням виробництва або споживання енергії, а й із підвищенням ефективності її використання, диверсифікацією джерел, модернізацією енергетичної системи та зниженням екологічного навантаження.

У роботі було охарактеризовано сутність вуглецевої інтенсивності та значення відновлюваної енергетики у переході до низьковуглецевої моделі розвитку. Визначено, що вуглецева інтенсивність відображає не тільки обсяг викидів, а й технологічний рівень економіки, структуру енергоспоживання та ефективність використання ресурсів. Розвиток відновлюваної енергетики розглядається як один із ключових напрямів зменшення залежності від викопного палива, скорочення викидів і формування більш екологічно орієнтованої економічної моделі.

Для проведення практичного аналізу було обґрунтовано систему показників енергетичного розвитку країн світу. До неї увійшли показники економічного розвитку, структури електроенергетики, загального енергоспоживання, імпорту енергії, експорту палива, промислової структури, урбанізації, розвитку відновлюваної та низьковуглецевої енергетики, енергоємності, вуглецевої інтенсивності, а також споживання вугілля, газу та нафти. Такий набір показників дозволив оцінювати країни не за окремими індикаторами, а за комплексними енергетичними профілями.

У процесі дослідження було сформовано інформаційну базу, здійснено попередню обробку даних і стандартизацію показників. Інформаційною основою роботи стали дані Світового банку DataBank / World Development Indicators та інші відкриті міжнародні статистичні джерела. На етапі підготовки даних було вилучено агреговані регіональні та доходні групи, перевірено повноту інформації, оброблено пропущені значення та сформовано фінальний набір даних. Оскільки показники мали різні одиниці вимірювання і масштаб, було проведено Z-стандартизацію, що забезпечило коректність подальшого застосування методів кластеризації.

Кореляційний аналіз дозволив виявити основні взаємозв'язки між економічними, енергетичними та екологічними показниками. Було встановлено, що ВВП на душу населення пов'язаний зі споживанням електроенергії, урбанізацією, загальним енергоспоживанням і розвитком окремих низьковуглецевих джерел. Водночас між ВВП на душу населення та вуглецевою інтенсивністю економіки спостерігається обернений зв'язок, що свідчить про вищу екологічну ефективність економічно розвиненіших країн. Також підтверджено зв'язок між виробництвом електроенергії з викопного палива та вищим рівнем вуглецевої інтенсивності.

У роботі було обґрунтовано використання методів кластерного аналізу та застосовано методи K-means, BIRCH, DBSCAN і карти Кохонена. Для оцінювання якості кластеризації використовувалися коефіцієнт силуєту, індекс Калінського - Харабаша, індекс Девіса - Болдіна та агрегований показник AV. За результатами порівняння найкращим методом серед класичних алгоритмів було визначено K-

means із поділом на 8 кластерів. Метод BIRCH також показав якісний результат при 4 кластерах, однак поступився K-means за сукупною оцінкою метрик. DBSCAN виявився менш придатним для основного аналізу через значну частку шумових спостережень і нерівномірний розподіл між кластерами.

За результатами кластеризації та побудови карт Кохонена було визначено групи країн зі схожими енергетичними профілями та проаналізовано основні закономірності їхнього розвитку. Перша карта Кохонена дозволила виділити країни з розвиненою низьковуглецевою енергетикою, країни з активною перехідною моделлю, країни зі змішаним профілем, великі енергетичні системи та країни з паливно-ресурсною спеціалізацією. Друга карта Кохонена дала змогу проаналізувати структуру виробництва та споживання енергоресурсів і виділити країни з диверсифікованою електроенергетикою, паливно-ресурсні економіки, великі енергоспоживчі системи, індустриально-урбанізовані країни, викопно-паливні країни та диверсифіковані перехідні енергетичні системи.

На основі отриманих результатів було сформовано рекомендації щодо політики впровадження відновлюваної енергетики для країн різних кластерів. Для країн із розвиненою низьковуглецевою енергетикою пріоритетом є підвищення гнучкості енергосистеми, розвиток накопичувачів енергії та подальша електрифікація. Для паливно-ресурсних країн важливою є диверсифікація економіки та спрямування частини доходів від викопного палива у чисті технології. Для великих енергоспоживчих систем ключовим є масштабне скорочення вуглецевого навантаження, розвиток сонячної та вітрової генерації й декарбонізація промисловості. Для викопно-паливних і перехідних країн важливими є модернізація мереж, розвиток розподіленої генерації, підвищення енергоефективності та поступове скорочення залежності від традиційних джерел енергії.

Отже, результати дослідження підтвердили доцільність використання кластерного аналізу та карт Кохонена для моделювання енергетичного розвитку країн світу. Запропонований підхід дозволяє порівнювати країни не за окремими показниками, а за комплексними енергетичними профілями, враховуючи

економічні, енергетичні, структурні та екологічні характеристики. Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для оцінювання рівня декарбонізації, виявлення груп країн із подібними проблемами та формування більш обґрунтованої політики впровадження відновлюваної енергетики. Таким чином, поставлену у вступі мету було досягнуто, а визначені завдання виконано.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kholod, A. (2024). Alternative energy as a driver of transformation processes in the energy sector. *Visnyk of Sumy State University. Economy Series, 1*, 17–26. <https://doi.org/10.21272/1817-9215.2024.1-02>
2. Андрійчук, І., Наритник, П., & Витвицька, У. (2025). Інноваційні чинники розвитку відновлюваної енергетики України. *Економіка та суспільство, 81*. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-81-122>
3. Пшибельський, В. В. (2024). Відновлювана енергетика як драйвер становлення зеленої економіки України. *Інноваційна економіка, 4*, 166–171. <https://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1370>
4. Dugo, V., Gálvez-Ruiz, D., & Díaz-Cuevas, P. (2025). The sustainable energy development dilemma in European countries: A time-series cluster analysis. *Energy, Sustainability and Society, 15*, Article 36. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00536-w>
5. Alotaiq, A. (2024). Global low carbon transitions in the power sector: A machine learning clustering approach using archetypes. *Journal of Economy and Technology, 2*, 95–127. <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.03.002>
6. International Renewable Energy Agency. (2024). *World energy transitions outlook 2024: 1.5°C pathway*. IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024>
7. International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
8. Ukoba, K., Onisuru, O. R., & Jen, T.-C. (2024). Harnessing machine learning for sustainable futures: Advancements in renewable energy and climate change mitigation. *Bulletin of the National Research Centre, 48*. <https://doi.org/10.1186/s42269-024-01254-7>

9. Peng, K., et al. (2023). The global power sector's low-carbon transition may enhance sustainable development goal progress. *Nature Communications*, 14, Article 3144. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38987-4>
10. Кабінет Міністрів України. (2024, 13 серпня). Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання (Розпорядження № 761-р). <https://zakon.rada.gov.ua/go/761-2024-%D1%80>
11. Затонацька, Т. Г., & Іваницький, М. В. (2024). Енергетичний сектор України: сучасний стан та подальші перспективи. *Ефективна економіка*, 4. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.26>
12. Toman, M., & Jemelkova, B. (2003). *Energy and economic development: An assessment of the state of knowledge (Discussion Paper 03-13)*. Resources for the Future. <https://media.rff.org/documents/RFF-DP-03-13.pdf>
13. Біла, С. О., & Шваюк, Ю. Е. (2016). Роль енергетичного сектору у зростанні конкурентоспроможності національної економіки: світовий досвід та реалії України. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*, 10(1), 30–35. http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/10_1_2016ua/8.pdf
14. Stern, D. I. (2010). *The role of energy in economic growth (USAEE-IAEE Working Paper No. 10-055)*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1715855>
15. Денисюк, С. П. (2019). Енергетичний перехід – вимоги якісних змін у розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 1(55), 7–28. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2019.182171>
16. Ozturk, I. (2010). A literature survey on energy-growth nexus. *Energy Policy*, 38(1), 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.024>
17. Олексюк, В. (2013). Енергетична диверсифікація як фактор економічного зростання. *Mechanism of an Economic Regulation*, 4(62), 174–182. <https://mer-journal.sumy.ua/index.php/journal/article/view/557>
18. Grubler, A., Johansson, T. B., Mundaca, L., Nakicenovic, N., Pachauri, S., Riahi, K., Rogner, H.-H., & Strupeit, L. (2012). Energy and economy. In T. B. Johansson,

- A. Patwardhan, N. Nakicenovic, & L. Gomez-Echeverri (Eds.), *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future* (pp. 385–422). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511793677.012>
19. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Шпілевський В. В., Крячко Є. М (2023). Енергоефективність економіки України за видами економічної діяльності. *Проблеми економіки*, 2, 41–55. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2023-2-41-55>
 20. Omri, A. (2014). An international literature survey on energy-economic growth nexus: Evidence from country-specific studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 951–959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.084>
 21. Дугінець, Г., & Таран, М. (2024). Енергетична стійкість європейських країн: досвід для України. *Економіка та суспільство*, 65. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-118>
 22. Bhuiyan, M. A., Zhang, Q., Khare, V., Mikhaylov, A., Pinter, G., & Huang, X. (2022). Renewable energy consumption and economic growth nexus-A systematic literature review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article 878394. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878394>
 23. Dogan, E., Altinoz, B., Madaleno, M., & Taskin, D. (2020). The impact of renewable energy consumption to economic growth: A replication and extension of Inglesi-Lotz (2016). *Energy Economics*, 90, Article 104866. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104866>
 24. Дороніна, І. І. (2020). Екологізація економіки та роль держави: ретроспективний аналіз наукових підходів. *Наукові записки Інституту законодавства Верховної Ради України*, 6, 100-107.
 25. Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
 26. Гнедіна, К., & Сорока, А. (2023). Декарбонізація економіки як чинник забезпечення кліматично нейтрального майбутнього: сучасні виклики і перспективи в Україні та світі. *Економіка та суспільство*, 54. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-76>

27. Непеїна, Г. В. (2019). Екологізація економіки як один зі шляхів реалізації моделі сталого розвитку України. *Екологічні науки*, 3. <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2019/3/31.pdf>
28. Burke, P. J., Shahiduzzaman, M., & Stern, D. I. (2015). Carbon dioxide emissions in the short run: The rate and sources of economic growth matter. *Global Environmental Change*, 33, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.04.012>
29. Rahman, M. M., Sultana, N., & Velayutham, E. (2022). Renewable energy, energy intensity and carbon reduction: Experience of large emerging economies. *Renewable Energy*, 184, 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.068>
30. Джусов, О. А., & Красніков, П. Д. (2019). Сталий розвиток, екологічний менеджмент та альтернативна енергетика. *Економічний простір*, 150. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/150-16>
31. Chen, J., Gao, M., Cheng, S., Xu, Y., Song, M., Liu, Y., Hou, W., & Wang, S. (2022). Evaluation and drivers of global low-carbon economies based on satellite data. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9, Article 153. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01171-y>
32. Горбач, В. В. (2025). Концепція низьковуглецевого розвитку: періодизація становлення в науці та суспільстві. *Приазовський економічний вісник*, 1. <https://doi.org/10.32782/2522-4263/2025-1-2>
33. Mirziyoyeva, Z., & Salahodjaev, R. (2022). Renewable energy and CO₂ emissions intensity in the top carbon intense countries. *Renewable Energy*, 192, 507–512. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.137>
34. Цимбаленко, Я. Ю. (2015). Екологізація соціально-економічної системи як основа сталого розвитку економіки. *Економіка та держава*, 2. http://www.economy.in.ua/pdf/2_2015/6.pdf
35. Freire-González, J., Padilla Rosa, E., & Raymond, J. Ll. (2024). World economies' progress in decoupling from CO₂ emissions. *Scientific Reports*, 14, Article 20480. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2>

- 36.Печенюк, А. В. (2023). Перспективи екологізації економіки України в умовах європейської інтеграції. *Інноваційна економіка*, 1. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2023.1.14>
- 37.Peng, J., Hu, X., Fan, X., Wang, K., & Gong, H. (2023). The impact of the green economy on carbon emission intensity: Comparisons, challenges, and mitigating strategies. *Sustainability*, 15(14), Article 10965. <https://doi.org/10.3390/su151410965>
- 38.Горбач, В. (2025). Фінансові інструменти декарбонізації: механізми зелених облігацій та ESG-інвестицій. *Економіка та суспільство*, 75. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-75-33>
- 39.Tudor, C., & Sova, R. (2021). On the impact of GDP per capita, carbon intensity and innovation for renewable energy consumption: Worldwide evidence. *Energies*, 14(19), Article 6254. <https://doi.org/10.3390/en14196254>
- 40.Matviychuk, A., Zhytkevych, O., & Osadcha, N. (2024). Modeling carbon dioxide emissions reduction. *Energy Reports*, 12, 1876–1887. <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2024.08.004>
- 41.International Energy Agency. (n.d.). *Energy end-uses and efficiency indicators data explorer*. Retrieved June 1, 2026, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-indicators-data-explorer>
- 42.Приходько, І. В., Ігнатишин, В. І., & Приходько, Ю. Б. (2024). Особливості розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі. *Економіка та суспільство*, 62. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-47>
- 43.Poznyak, S., & Kolyada, Y. (2023). Comparative analysis of the effectiveness of dimensionality reduction algorithms and clustering methods on the problem of modelling economic growth. *Neuro-Fuzzy Modeling Techniques in Economics*, 12, 67–110. <https://doi.org/10.33111/nfmte.2023.067>
- 44.Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

- 45.Caliński, T., & Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics*, 3(1), 1–27.
<https://doi.org/10.1080/03610927408827101>
- 46.Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-1*(2), 224–227.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>
- 47.Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 226–231). AAAI Press. <https://file.biolab.si/papers/1996-DBSCAN-KDD.pdf>
- 48.Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H.-P., & Xu, X. (2017). DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*, 42(3), Article 19.
<https://doi.org/10.1145/3068335>
- 49.Osadcha, N., Zhytkevych, O., & Matviychuk, A. (2025). *Comprehensive comparative analysis of clustering methods in the context of modeling nations' decarbonization potentials*. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5598455>

ДОДАТОК А

```

import os
from functools import reduce
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import RegularPolygon
from matplotlib.lines import Line2D
from collections import defaultdict
import matplotlib.path as mpath
from minisom import MiniSom
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.metrics import (
    silhouette_score,
    calinski_harabasz_score,
    davies_bouldin_score
)
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
DATA_DIR = r""
OUTPUT_DIR = os.path.join(DATA_DIR, "")
os.makedirs(OUTPUT_DIR, exist_ok=True)
START_YEAR = 2011
END_YEAR = 2022
YEARS = list(range(START_YEAR, END_YEAR + 1))
# 1. ОБ'ЄДНАННЯ ВХІДНИХ ДАТАСЕТІВ
files = {
    "ВВП на душу населення": "ВВП на душу населення.xlsx",
    "Виробництво електроенергії з нафти газу та вугілля": "Виробництво електроенергії з нафти, газу та вугілля (у % від загального обсягу).xlsx",
    "Вуглецева інтенсивність економіки": "Вуглецева інтенсивність економіки.xlsx",
    "Експорт палива": "Експорт палива (% від товарного експорту).xlsx",
    "Загальне енергоспоживання": "Загальне енергоспоживання.xlsx",
    "Імпорт енергії": "Імпорт енергії (% від споживання).xlsx",
    "Промисловість": "Промисловість (% ВВП).xlsx",
    "Урбанізація": "Урбанізація (% населення в містах).xlsx",
    "Споживання енергії з відновлюваних джерел": "Споживання енергії з відновлюваних джерел.xlsx",
    "Альтернативна та ядерна енергетика": "Альтернативна та ядерна енергетика (у відсотках від загального споживання енергії).xlsx",
    "Споживання електроенергії": "Споживання електроенергії (кВт·год на душу населення).xlsx",
    "Рівень енергоємності первинної енергії": "Рівень енергоємності первинної енергії.xlsx",
    "Населення": "Population, total.xlsx"
}
csv_files = {
    "Споживання вугілля": {
        "file_name": "coal-consumption-by-country-terawatt-hours-twh.csv",
        "value_col": "Coal"
    },
    "Споживання газу": {
        "file_name": "gas-consumption-by-country.csv",
        "value_col": "Gas"
    },
    "Споживання нафти": {
        "file_name": "oil-consumption-by-country.csv",
        "value_col": "Oil"
    },
    "Частка електроенергії з низьковуглецевих джерел": {
        "file_name": "share-electricity-low-carbon.csv",
        "value_col": "Share of electricity from low-carbon sources"
    },
    "Частка електроенергії з сонця та вітру": {
        "file_name": "share-of-electricity-production-from-solar-and-wind.csv",
        "value_col": "Solar and wind"
    },
    "Частка електроенергії з відновлюваних джерел": {
        "file_name": "share-electricity-renewables.csv",
        "value_col": "Renewables"
    }
}

```

```

indicator_bases = [
    "ВВП_на_душу_населення",
    "Виробництво_електроенергії_з_нафти_газу_та_вугілля",
    "Вуглецева_інтенсивність_економіки",
    "Експорт_палива",
    "Загальне_енергоспоживання",
    "Імпорт_енергії",
    "Промисловість",
    "Урбанізація",
    "Споживання_енергії_з_відновлюваних_джерел",
    "Частка_електроенергії_з_низьковуглецевих_джерел",
    "Частка_електроенергії_з_сонця_та_вітру",
    "Частка_електроенергії_з_відновлюваних_джерел",
    "Альтернативна_та_ядерна_енергетика",
    "Споживання_електроенергії",
    "Рівень_енергоємності_первинної_енергії",
    "Споживання_вугілля",
    "Споживання_газу",
    "Споживання_нафти"
]

def load_indicator_period(file_name, variable_name, keep_country_name=True):
    file_path = os.path.join(DATA_DIR, file_name)
    df_temp = pd.read_excel(file_path, sheet_name="Data")
    year_cols = []
    for col in df_temp.columns:
        if "[YR]" in str(col):
            year = int(str(col).split(" ")[0])
            if START_YEAR <= year <= END_YEAR:
                year_cols.append(col)
    base_cols = ["Country Code"] + year_cols
    if keep_country_name:
        base_cols = ["Country Name"] + base_cols
    df_temp = df_temp[base_cols].copy()
    rename_dict = {
        col: f"{variable_name}_{str(col).split(' ')[0]}"
        for col in year_cols
    }
    df_temp = df_temp.rename(columns=rename_dict)
    value_cols = [
        col for col in df_temp.columns
        if col not in ["Country Name", "Country Code"]
    ]
    for col in value_cols:
        df_temp[col] = pd.to_numeric(df_temp[col], errors="coerce")
    df_temp = df_temp[df_temp["Country Code"].notna()].copy()
    df_temp = df_temp.drop_duplicates()
    df_temp = df_temp.drop_duplicates(subset=["Country Code"], keep="first")
    return df_temp

def load_csv_indicator_period(file_name, variable_name, value_col):
    file_path = os.path.join(DATA_DIR, file_name)
    df_temp = pd.read_csv(file_path)
    df_temp = df_temp.rename(columns={
        "Entity": "Country Name",
        "Code": "Country Code"
    })
    df_temp = df_temp[
        (df_temp["Year"].between(START_YEAR, END_YEAR)) &
        (df_temp["Country Code"].notna())
    ].copy()
    df_temp = df_temp[
        ~df_temp["Country Code"].astype(str).str.startswith("OWID_")
    ].copy()
    df_temp[value_col] = pd.to_numeric(df_temp[value_col], errors="coerce")
    df_temp = (
        df_temp
        .groupby(["Country Code", "Year"], as_index=False)[value_col]
        .mean()
    )
    df_wide = df_temp.pivot(

```

```

        index="Country Code",
        columns="Year",
        values=value_col
    ).reset_index()
    rename_dict = {
        year: f'{variable_name}_{year}'
        for year in YEARS
        if year in df_wide.columns
    }
    df_wide = df_wide.rename(columns=rename_dict)
    return df_wide
dfs = []
for i, (variable_name, file_name) in enumerate(files.items()):
    temp_df = load_indicator_period(
        file_name=file_name,
        variable_name=variable_name,
        keep_country_name=(i == 0)
    )
    dfs.append(temp_df)
for variable_name, params in csv_files.items():
    temp_df = load_csv_indicator_period(
        file_name=params["file_name"],
        variable_name=variable_name,
        value_col=params["value_col"]
    )
    dfs.append(temp_df)
merged_df = reduce(
    lambda left, right: pd.merge(left, right, on="Country Code", how="outer"),
    dfs
)
first_cols = ["Country Name", "Country Code"]
other_cols = [col for col in merged_df.columns if col not in first_cols]
merged_df = merged_df[first_cols + other_cols]
merged_df = merged_df.sort_values("Country Name").reset_index(drop=True)
# 2. ОЧИЩЕННЯ ДАНИХ І ЗАПОВНЕННЯ ПРОПУСКІВ
aggregate_codes = {
    "WLD", "AFE", "AFW", "SSA", "SSF", "TSS", "ECS", "ECA", "TEC",
    "CEB", "EUU", "EMU", "EAS", "EAP", "TEA", "LCN", "LAC", "TLA",
    "CSS", "MEA", "MNA", "TMN", "ARB", "SAS", "TSA", "HIC", "LIC",
    "LMC", "LMY", "MIC", "UMC", "IBD", "IBT", "IBB", "IBN", "IDA",
    "IDB", "IDX", "INX", "OED", "NAC", "PRE", "PST", "OSS", "PSS",
    "FCS", "HPC", "LTE", "EAR", "LDC", "PSE"
}
df = merged_df[~merged_df["Country Code"].isin(aggregate_codes)].copy()
df = df.sort_values("Country Name").reset_index(drop=True)
all_indicator_cols = []
for base in indicator_bases:
    for year in YEARS:
        col = f'{base}_{year}'
        if col in df.columns:
            all_indicator_cols.append(col)
df["Кількість пропусків_2011_2022"] = df[all_indicator_cols].isna().sum(axis=1)
missing_summary = df[
    ["Country Name", "Country Code", "Кількість пропусків_2011_2022"]
].sort_values(by="Кількість пропусків_2011_2022", ascending=False)
MAX_ALLOWED_MISSING = 2
removed_countries_missing = df[
    df["Кількість пропусків_2011_2022"] > MAX_ALLOWED_MISSING
].copy()
df_clean = df[
    df["Кількість пропусків_2011_2022"] <= MAX_ALLOWED_MISSING
].copy().reset_index(drop=True)
df_final = df_clean.copy()
gdp_2022 = "ВВП на душу населення_2022"
if gdp_2022 in df_final.columns:
    gdp_series = df_final[gdp_2022].fillna(df_final[gdp_2022].mean())
    df_final["Класифікація за рівнем розвитку"] = pd.qcut(
        gdp_series.rank(method="first"),
        q=4,

```

```

        labels=[
            "Низький рівень розвитку",
            "Нижчий середній рівень розвитку",
            "Вищий середній рівень розвитку",
            "Високий рівень розвитку"
        ]
    )
else:
    df_final["Класифікація_за_рівнем_розвитку"] = "Без класифікації"
for base in indicator_bases:
    base_cols = [
        f"{base}_{year}"
        for year in YEARS
        if f"{base}_{year}" in df_final.columns
    ]
    if len(base_cols) == 0:
        continue
    df_final[base_cols] = df_final[base_cols].T.interpolate(
        method="linear",
        limit_direction="both"
    ).T
    for col in base_cols:
        df_final[col] = df_final.groupby("Класифікація_за_рівнем_розвитку")[col].transform(
            lambda x: x.fillna(x.median())
        )
        df_final[col] = df_final[col].fillna(df_final[col].mean())
df_final["Кількість_пропусків_після_заповнення"] = (
    df_final[all_indicator_cols].isna().sum(axis=1)
)
# 3. ФОРМУВАННЯ ПАНЕЛЬНОГО ДАТАСЕТУ
panel_parts = []
for year in YEARS:
    year_cols = []
    rename_dict = {}
    for base in indicator_bases:
        col = f"{base}_{year}"
        if col in df_final.columns:
            year_cols.append(col)
            rename_dict[col] = base
    temp = df_final[["Country Name", "Country Code"] + year_cols].copy()
    temp = temp.rename(columns=rename_dict)
    temp["Year"] = year
    temp["Класифікація_за_рівнем_розвитку"] = df_final["Класифікація_за_рівнем_розвитку"]
    panel_parts.append(temp)
panel_df = pd.concat(panel_parts, ignore_index=True)
panel_df = panel_df.sort_values(["Country Name", "Year"]).reset_index(drop=True)
# 4. З-СТАНДАРТИЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ
numeric_cols = [col for col in indicator_bases if col in panel_df.columns]
panel_z = panel_df.copy()
scaler = StandardScaler()
panel_z[numeric_cols] = scaler.fit_transform(panel_z[numeric_cols])
# 5. КЛАСТЕРИЗАЦІЯ K-MEANS
cluster_cols = [col for col in indicator_bases if col in panel_z.columns]
X = panel_z[cluster_cols].copy()
k_range = range(3, 9)
kmeans_results = []
for k in k_range:
    kmeans_temp = KMeans(
        n_clusters=k,
        random_state=42,
        n_init=20
    )
    labels_temp = kmeans_temp.fit_predict(X)
    kmeans_results.append({
        "Кількість_кластерів": k,
        "Silhouette_Score": silhouette_score(X, labels_temp),
        "Calinski_Harabasz": calinski_harabasz_score(X, labels_temp),
        "Davies_Bouldin": davies_bouldin_score(X, labels_temp),
        "Inertia": kmeans_temp.inertia_
    })

```

```

    })
    kmeans_results_df = pd.DataFrame(kmeans_results)
    kmeans_results_df["SC_z"] = (
        kmeans_results_df["Silhouette_Score"] -
        kmeans_results_df["Silhouette_Score"].mean()
    ) / kmeans_results_df["Silhouette_Score"].std()
    kmeans_results_df["CH_z"] = (
        kmeans_results_df["Calinski_Harabasz"] -
        kmeans_results_df["Calinski_Harabasz"].mean()
    ) / kmeans_results_df["Calinski_Harabasz"].std()
    kmeans_results_df["DBI_z"] = (
        kmeans_results_df["Davies_Bouldin"] -
        kmeans_results_df["Davies_Bouldin"].mean()
    ) / kmeans_results_df["Davies_Bouldin"].std()
    kmeans_results_df["AV"] = (
        kmeans_results_df["SC_z"] +
        kmeans_results_df["CH_z"] -
        kmeans_results_df["DBI_z"]
    )
    optimal_k = int(
        kmeans_results_df.loc[
            kmeans_results_df["AV"].idxmax(),
            "Кількість_кластерів"
        ]
    )
    plt.figure(figsize=(8, 5))
    plt.plot(
        kmeans_results_df["Кількість_кластерів"],
        kmeans_results_df["Silhouette_Score"],
        marker="o"
    )
    plt.title("Silhouette Score для K-means")
    plt.xlabel("Кількість кластерів")
    plt.ylabel("Silhouette Score")
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig(
        os.path.join(OUTPUT_DIR, "kmeans_silhouette_score.png"),
        dpi=300,
        bbox_inches="tight"
    )
    plt.show()
    kmeans_model = KMeans(
        n_clusters=optimal_k,
        random_state=42,
        n_init=20
    )
    panel_z["Кластер_KMeans"] = kmeans_model.fit_predict(X)
    panel_df["Кластер_KMeans"] = panel_z["Кластер_KMeans"]
    panel_df["Назва_кластера_KMeans"] = "Кластер " + panel_df["Кластер_KMeans"].astype(str)
    kmeans_distribution = (
        panel_df
        .groupby(["Кластер_KMeans", "Назва_кластера_KMeans"])
        .size()
        .reset_index(name="Кількість_спостережень")
    )
    kmeans_distribution["Частка_спостережень_%"] = (
        kmeans_distribution["Кількість_спостережень"] / len(panel_df) * 100
    ).round(2)
    kmeans_profile = (
        panel_df
        .groupby(["Кластер_KMeans", "Назва_кластера_KMeans"])[cluster_cols]
        .mean()
        .reset_index()
    )
    kmeans_countries = panel_df[
        ["Country Name", "Country Code", "Year", "Кластер_KMeans", "Назва_кластера_KMeans"] + cluster_cols
    ].sort_values(by=["Кластер_KMeans", "Country Name", "Year"])
# 6. КАРТА КОХОНЕНА SOM

```

```

som_cols = [col for col in indicator_bases if col in panel_z.columns]
X_som = panel_z[som_cols].values
som_x = 12
som_y = 8
som = MiniSom(
    x=som_x,
    y=som_y,
    input_len=X_som.shape[1],
    sigma=1.2,
    learning_rate=0.45,
    neighborhood_function="gaussian",
    random_seed=42
)
som.random_weights_init(X_som)
som.train_random(X_som, num_iteration=5000, verbose=True)
som_weights = som.get_weights().reshape(som_x * som_y, X_som.shape[1])
som_k_range = range(3, 8)
som_k_results = []
som_labels_dict = {}
for k in som_k_range:
    km = KMeans(
        n_clusters=k,
        random_state=42,
        n_init=20
    )
    labels = km.fit_predict(som_weights)
    som_k_results.append({
        "Кількість_кластерів": k,
        "Silhouette_Score": silhouette_score(som_weights, labels),
        "Calinski_Harabasz": calinski_harabasz_score(som_weights, labels),
        "Davies_Bouldin": davies_bouldin_score(som_weights, labels)
    })
    som_labels_dict[k] = labels
som_k_results_df = pd.DataFrame(som_k_results)
som_k_results_df["SC_z"] = (
    som_k_results_df["Silhouette_Score"] -
    som_k_results_df["Silhouette_Score"].mean()
) / som_k_results_df["Silhouette_Score"].std()
som_k_results_df["CH_z"] = (
    som_k_results_df["Calinski_Harabasz"] -
    som_k_results_df["Calinski_Harabasz"].mean()
) / som_k_results_df["Calinski_Harabasz"].std()
som_k_results_df["DBI_z"] = (
    som_k_results_df["Davies_Bouldin"] -
    som_k_results_df["Davies_Bouldin"].mean()
) / som_k_results_df["Davies_Bouldin"].std()
som_k_results_df["AV"] = (
    som_k_results_df["SC_z"] +
    som_k_results_df["CH_z"] -
    som_k_results_df["DBI_z"]
)
best_som_k = int(
    som_k_results_df.loc[
        som_k_results_df["AV"].idxmax(),
        "Кількість_кластерів"
    ]
)
som_neuron_labels = som_labels_dict[best_som_k]
som_cluster_map = som_neuron_labels.reshape(som_x, som_y)
bmu_coords = np.array([som.winner(x) for x in X_som])
panel_df["SOM_X"] = bmu_coords[:, 0]
panel_df["SOM_Y"] = bmu_coords[:, 1]
panel_df["Кластер_SOM"] = [
    som_cluster_map[x, y]
    for x, y in zip(panel_df["SOM_X"], panel_df["SOM_Y"])
]
panel_z["SOM_X"] = panel_df["SOM_X"]
panel_z["SOM_Y"] = panel_df["SOM_Y"]
panel_z["Кластер_SOM"] = panel_df["Кластер_SOM"]

```

```

som_cluster_profile = panel_df.groupby("Кластер_SOM")[som_cols].mean()
som_cluster_profile_z = panel_z.groupby("Кластер_SOM")[som_cols].mean()
# 7. KAPTA KOXOHEHA SOM: PYX KPAIH 3A 2011–2022 PP.
if 6 in som_labels_dict:
    best_som_k = 6
    som_neuron_labels = som_labels_dict[best_som_k]
    som_cluster_map = som_neuron_labels.reshape(som_x, som_y)
COUNTRIES_TO_PLOT = [
    "USA", "BRA", "NGA",
    "DEU", "GBR", "NLD", "FRA", "CHE", "SWE", "NOR",
    "ITA", "ESP", "PRT", "POL", "ROU", "BGR", "CZE", "SVK", "HUN",
    "UKR", "KAZ", "ARM", "AZE", "GEO",
    "SAU", "ARE",
    "CHN", "IND", "IDN", "KOR", "JPN",
    "AUS", "CAN",
    "ZAF", "EGY",
    "MEX", "ARG", "TUR", "ALB"
]
FIGSIZE = (16, 10)
LABEL_FONTSIZE = 12
TITLE_FONTSIZE = 18
SAVE_DPI = 500
def hex_center(i, j):
    x = i + 0.5 * (j % 2)
    y = j * np.sqrt(3) / 2
    return x, y
def format_year_range(start_year, end_year):
    start_short = str(start_year)[-2:]
    end_short = str(end_year)[-2:]
    if start_year == end_year:
        return start_short
    return f"{start_short}-{end_short}"
def build_country_segments(country_df):
    country_df = country_df.sort_values("Year").reset_index(drop=True)
    country_code = country_df.loc[0, "Country Code"]
    country_name = country_df.loc[0, "Country Name"]
    raw_runs = []
    current_start_year = int(country_df.loc[0, "Year"])
    current_end_year = int(country_df.loc[0, "Year"])
    current_x = int(country_df.loc[0, "SOM_X"])
    current_y = int(country_df.loc[0, "SOM_Y"])
    for i in range(1, len(country_df)):
        row = country_df.loc[i]
        row_year = int(row["Year"])
        row_x = int(row["SOM_X"])
        row_y = int(row["SOM_Y"])
        if row_x == current_x and row_y == current_y:
            current_end_year = row_year
        else:
            raw_runs.append({
                "Country Name": country_name,
                "Country Code": country_code,
                "Start_Year": current_start_year,
                "End_Year": current_end_year,
                "SOM_X": current_x,
                "SOM_Y": current_y,
                "Year_Range": format_year_range(current_start_year, current_end_year)
            })
            current_start_year = row_year
            current_end_year = row_year
            current_x = row_x
            current_y = row_y
    raw_runs.append({
        "Country Name": country_name,
        "Country Code": country_code,
        "Start_Year": current_start_year,
        "End_Year": current_end_year,
        "SOM_X": current_x,
        "SOM_Y": current_y,
    })

```

```

        "Year_Range": format_year_range(current_start_year, current_end_year)
    })
    raw_runs_df = pd.DataFrame(raw_runs)
    merged_segments = []
    for (code, x, y), group in raw_runs_df.groupby(["Country Code", "SOM_X", "SOM_Y"]):
        group = group.sort_values("Start_Year")
        year_ranges = group["Year_Range"].tolist()
        if (
            len(year_ranges) == 1
            and int(group["Start_Year"].iloc[0]) == START_YEAR
            and int(group["End_Year"].iloc[0]) == END_YEAR
        ):
            label_text = code
        else:
            label_text = code + " " + ", ".join(year_ranges)
        segment_id = f"{code}_{x}_{y}"
        merged_segments.append({
            "Segment_ID": segment_id,
            "Country Name": country_name,
            "Country Code": code,
            "SOM_X": int(x),
            "SOM_Y": int(y),
            "Start_Year": int(group["Start_Year"].min()),
            "End_Year": int(group["End_Year"].max()),
            "Label": label_text
        })
    transitions = []
    for i in range(len(raw_runs_df) - 1):
        start_run = raw_runs_df.iloc[i]
        end_run = raw_runs_df.iloc[i + 1]
        from_id = f"{country_code}_{int(start_run['SOM_X'])}_{int(start_run['SOM_Y'])}"
        to_id = f"{country_code}_{int(end_run['SOM_X'])}_{int(end_run['SOM_Y'])}"
        if from_id != to_id:
            transitions.append({
                "Country Code": country_code,
                "From_Segment_ID": from_id,
                "To_Segment_ID": to_id,
                "From_Year": int(start_run["End_Year"]),
                "To_Year": int(end_run["Start_Year"])
            })
    return merged_segments, transitions

def assign_offsets_for_segments(segments_df, offset_radius=0.24, ring_step=0.10):
    segments_df = segments_df.copy().reset_index(drop=True)
    segments_df["plot_x"] = np.nan
    segments_df["plot_y"] = np.nan
    grouped = defaultdict(list)
    for idx, row in segments_df.iterrows():
        grouped[(row["SOM_X"], row["SOM_Y"])].append(idx)
    max_safe_radius = 0.26
    positions_per_ring = 6
    for (gx, gy), idx_list in grouped.items():
        cx, cy = hex_center(gx, gy)
        n = len(idx_list)
        if n == 1:
            segments_df.loc[idx_list[0], "plot_x"] = cx
            segments_df.loc[idx_list[0], "plot_y"] = cy
        else:
            for k, idx in enumerate(idx_list):
                ring = k // positions_per_ring
                pos_in_ring = k % positions_per_ring
                radius = min(offset_radius + ring * ring_step, max_safe_radius)
                angle = 2 * np.pi * pos_in_ring / positions_per_ring
                segments_df.loc[idx, "plot_x"] = cx + radius * np.cos(angle)
                segments_df.loc[idx, "plot_y"] = cy + radius * np.sin(angle)
    return segments_df

plot_base = panel_df.copy()
if COUNTRIES_TO_PLOT is not None:
    plot_base = plot_base[
        plot_base["Country Code"].isin(COUNTRIES_TO_PLOT)
    ]

```

```

].copy()
plot_base = plot_base.sort_values(["Country Code", "Year"]).reset_index(drop=True)
all_segments = []
all_transitions = []
for country_code, group in plot_base.groupby("Country Code"):
    group = group.sort_values("Year")
    if group["Year"].nunique() < 2:
        continue
    country_segments, country_transitions = build_country_segments(group)
    all_segments.extend(country_segments)
    all_transitions.extend(country_transitions)
segments_df = pd.DataFrame(all_segments)
transitions_df = pd.DataFrame(all_transitions)
if segments_df.empty:
    raise ValueError("Не вдалося побудувати сегменти. Перевір panel_df або COUNTRIES_TO_PLOT.")
segments_df["plot_x"] = segments_df.apply(
    lambda row: hex_center(row["SOM_X"], row["SOM_Y"])[0],
    axis=1
)
segments_df["plot_y"] = segments_df.apply(
    lambda row: hex_center(row["SOM_X"], row["SOM_Y"])[1],
    axis=1
)
country_codes_for_colors = sorted(segments_df["Country Code"].unique())
country_cmap = plt.cm.get_cmap("tab20", len(country_codes_for_colors))
country_color_map = {
    code: country_cmap(i)
    for i, code in enumerate(country_codes_for_colors)
}
cluster_fill_colors = {
    0: "#1f77b4",
    1: "#2ca02c",
    2: "#9467bd",
    3: "#e377c2",
    4: "#bcbd22",
    5: "#149685"
}
cluster_text_colors = {
    0: "red",
    1: "blue",
    2: "green",
    3: "black",
    4: "#006D77",
    5: "#fc4e03"
}
fig, ax = plt.subplots(figsize=FIGSIZE)
for i in range(som_x):
    for j in range(som_y):
        cx, cy = hex_center(i, j)
        cluster_id = int(som_cluster_map[i, j])
        hex_patch = RegularPolygon(
            (cx, cy),
            numVertices=6,
            radius=0.58,
            orientation=np.radians(30),
            facecolor=cluster_fill_colors.get(cluster_id, "#dddddd"),
            edgecolor="gray",
            linewidth=0.9,
            alpha=0.28
        )
        ax.add_patch(hex_patch)
segments_df["SOM_Cluster"] = segments_df.apply(
    lambda row: int(som_cluster_map[int(row["SOM_X"]), int(row["SOM_Y"])]),
    axis=1
)
segments_labels = assign_offsets_for_segments(
    segments_df.copy(),
    offset_radius=0.24,
    ring_step=0.10
)

```

```

)
segments_df["label_x"] = segments_labels["plot_x"]
segments_df["label_y"] = segments_labels["plot_y"]
manual_label_offsets = {
    "SAU 13-22": (-0.22, 0.15),
    "ARE 11-14,18": (-0.10, -0.10),
    "ARE 15-17": (0.22, -0.06),
    "SAU 11-12": (-0.05, 0.10),
    "PRT 11-12,15": (-0.18, 0.02),
    "PRT 13-14,19-22": (0.18, 0.06),
    "GBR 11-16": (0.00, -0.12),
    "DEU 19-22": (0.18, 0.08),
    "GBR 17-22": (0.00, -0.10),
    "DEU 11-18": (-0.10, -0.10),
}
for label_text, (dx, dy) in manual_label_offsets.items():
    mask = segments_df["Label"] == label_text
    if mask.any():
        segments_df.loc[mask, "label_x"] = segments_df.loc[mask, "label_x"] + dx
        segments_df.loc[mask, "label_y"] = segments_df.loc[mask, "label_y"] + dy
problem_codes = ["GBR", "DEU", "NLD"]
problem_cells = (
    segments_df[segments_df["Country Code"].isin(problem_codes)]
    .groupby(["SOM_X", "SOM_Y"])["Country Code"]
    .nunique()
    .reset_index(name="n_problem_countries")
)
problem_cells = problem_cells[
    problem_cells["n_problem_countries"] >= 2
].copy()
if not problem_cells.empty:
    target_som_x = int(problem_cells.iloc[0]["SOM_X"])
    target_som_y = int(problem_cells.iloc[0]["SOM_Y"])
    mask_problem = (
        (segments_df["SOM_X"] == target_som_x) &
        (segments_df["SOM_Y"] == target_som_y) &
        (segments_df["Country Code"].isin(problem_codes))
    )
    manual_offsets = {
        "GBR": (0.12, 0.0),
        "DEU": (0.00, -0.18)
    }
    for idx, row in segments_df[mask_problem].iterrows():
        code = row["Country Code"]
        if code in manual_offsets:
            dx, dy = manual_offsets[code]
            segments_df.loc[idx, "label_x"] = row["label_x"] + dx
            segments_df.loc[idx, "label_y"] = row["label_y"] + dy
for _, row in segments_df.iterrows():
    som_cluster = int(row["SOM_Cluster"])
    text_color = cluster_text_colors.get(som_cluster, "black")
    ax.text(
        row["label_x"],
        row["label_y"],
        row["Label"],
        fontsize=LABEL_FONTSIZE,
        ha="center",
        va="center",
        color=text_color,
        fontweight="normal",
        path_effects=[
            pe.withStroke(linewidth=0.9, foreground="white")
        ],
        zorder=6
    )
segment_lookup = segments_df.set_index("Segment_ID")
if not transitions_df.empty:
    for _, tr in transitions_df.iterrows():
        from_id = tr["From_Segment_ID"]

```

```

to_id = tr["To_Segment_ID"]
country_code = tr["Country Code"]
if from_id not in segment_lookup.index or to_id not in segment_lookup.index:
    continue
start_row = segment_lookup.loc[from_id]
end_row = segment_lookup.loc[to_id]
x1, y1 = start_row["plot_x"], start_row["plot_y"]
x2, y2 = end_row["plot_x"], end_row["plot_y"]
arrow_color = country_color_map.get(country_code, "black")
ax.annotate(
    "",
    xy=(x2, y2),
    xytext=(x1, y1),
    arrowprops=dict(
        arrowstyle="->",
        lw=1.2,
        color=arrow_color,
        alpha=0.75,
        shrinkA=5,
        shrinkB=5,
        mutation_scale=8,
        connectionstyle="arc3,rad=0.08"
    ),
    zorder=4
)
legend_handles = [
    Line2D(
        [0], [0],
        marker="h",
        color="w",
        label=f"Кластер {c}",
        markerfacecolor=cluster_fill_colors.get(c, "#dddddd"),
        markeredgecolor="gray",
        markersize=14
    )
    for c in range(best_som_k)
]
ax.legend(
    handles=legend_handles,
    title="Кластеры SOM",
    loc="upper left",
    bbox_to_anchor=(1.02, 1.0)
)
ax.set_title("Карта Кохонена SOM", fontsize=TITLE_FONT_SIZE)
ax.set_aspect("equal")
ax.axis("off")
x_min = min(segments_df["plot_x"].min(), segments_df["label_x"].min())
x_max = max(segments_df["plot_x"].max(), segments_df["label_x"].max())
y_min = min(segments_df["plot_y"].min(), segments_df["label_y"].min())
y_max = max(segments_df["plot_y"].max(), segments_df["label_y"].max())
zoom_padding_x = 0.55
zoom_padding_y = 0.40
ax.set_xlim(x_min - zoom_padding_x, x_max + zoom_padding_x)
ax.set_ylim(y_min - zoom_padding_y, y_max + zoom_padding_y)
plt.tight_layout()
som_map_file = os.path.join(
    OUTPUT_DIR,
    "kohonen_som_selected_countries_2011_2022.png"
)
plt.savefig(
    som_map_file,
    dpi=SAVE_DPI,
    bbox_inches="tight"
)
plt.show()

```



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

Моделювання розвитку відновлюваної енергетики країн світу за показниками енергоспоживання та вуглецевої інтенсивності економіки

Автор

Тасенко Денис Віталійович

Науковий керівник / Експерт

Матвійчук Андрій

ІД документу

334153759

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

**Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman
Science**

підрозділ

**Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman
Science**

ЗВІТ

Дата звіту

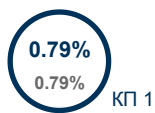
6/3/2026

Дата редагування

6/3/2026

Обсяг знайдених подібностей

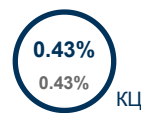
Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

**25**

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

**16585**

Кількість слів

**132778**

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		0
Інтервали		0
Мікропробіли		3
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		6

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	---

1	Мандриченко_Великоіваненко_плагіат 5/28/2025 Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики)	28 (0.17 %)
2	Мандриченко_Великоіваненко_плагіат 5/28/2025 Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики)	28 (0.17 %)
3	https://www.inter-nauka.com/uploads/public/17687537053322.pdf	13 (0.08 %)
4	https://www.scribd.com/document/876272255/5dc1f64a91286-2134752200-1747032646	12 (0.07 %)
5	КР Білуха 12/1/2025 Kharkiv Trade and Economic Professional College of State University of Trade and Economics (Kharkiv Trade and Economic Professional College of State University of Trade and Economics)	11 (0.07 %)
6	ЕФЕКТИВНІСТЬ ПУБЛІЧНОЇ ПОЛІТИКИ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ 2/18/2025 Academy of Labour, Social Relations and Tourism (Academy of Labour, Social Relations and Tourism)	11 (0.07 %)
7	Моделювання взаємодії економічного та цифрового розвитку в Європейському Союзі 5/20/2026 Kharkiv National University of Economics named after S.Kuznets (KNUE) (KNUE)	9 (0.05 %)
8	Розробка програмного комплексу автопілоту з використанням алгоритмів машинного навчання 6/8/2020 Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (кафедра економіко-математичного моделювання)	7 (0.04 %)
9	https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=71199	7 (0.04 %)
10	https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=71199	5 (0.03 %)

База даних RefBooks



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

Домашня база даних



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

Програма обміну базами даних (0.57 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

1	Мандриченко_Великоіваненко_плагіат 5/28/2025 Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики)	56 (2) (0.34 %)
2	ЕФЕКТИВНІСТЬ ПУБЛІЧНОЇ ПОЛІТИКИ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ 2/18/2025 Academy of Labour, Social Relations and Tourism (Academy of Labour, Social Relations and Tourism)	11 (1) (0.07 %)
3	КР Білуха 12/1/2025	11 (1) (0.07 %)

- 4 Моделювання взаємодії економічного та цифрового розвитку в Європейському Союзі 9 (1) (0.05 %)
5/20/2026
Kharkiv National University of Economics named after S.Kuznets (KNUE) (KNUE)
- 5 Розробка програмного комплексу автопілоту з використанням алгоритмів машинного навчання 7 (1) (0.04 %)
6/8/2020
Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (кафедра економіко-математичного моделювання)

Інтернет (0.22 %)



#	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
6	https://www.inter-nauka.com/uploads/public/17687537053322.pdf	13 (1) (0.08 %)
7	https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=71199	12 (2) (0.07 %)
8	https://www.scribd.com/document/876272255/5dc1f64a91286-2134752200-1747032646	12 (1) (0.07 %)



Список прийнятих фрагментів

#	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------	---------------------------------------