

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”  
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ  
к.т.н., професор  
\_\_\_\_\_ Петро ПЛЄШКОВ  
“\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої**  
**освіти**

на тему:

**«Інтегральне оцінювання енергоефективності**  
**регіональних енергетичних комплексів України»**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу, групи *ЕНМ-24М*  
ОПП «Енергетичний менеджмент»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»,

\_\_\_\_\_ Анастасія МІРОШНІЧЕНКО  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Катерина ПЕТРОВА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

# Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

\_\_\_\_\_ Петро ПЛЄШКОВ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Мірошніченко Анастасії Михайлівни*

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Інтегральне оцінювання енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України*

*Integrated assessment of energy efficiency of regional energy complexes in Ukraine*

2. Керівник роботи *Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент*

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *15.12.2025 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробленні та апробації науково-методичного підходу до інтегрального оцінювання рівня енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України на основі методів багатомірного статистики та світових практик. Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням завдань: 1) Проаналізувати теоретичні основи та принципи управління енергоефективністю, визначити системні проблеми та чинники, що впливають на раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів на регіональному рівні; 2) Здійснити порівняльний аналіз світових методик оцінювання енергетичної ефективності (ODYSSEE, MEA) та обґрунтувати застосування методів багатofакторного аналізу для оцінки складних регіональних систем; 3) Розробити систему індикаторів та визначити їх порогові значення, що відображають різні аспекти енергоефективності та енергетичної безпеки регіонів. 4) Виконати інтегральне оцінювання рівня енергоефективності територіальних громад із застосуванням таксонометричного індикатора та здійснити об'єктивний бенчмаркінг регіонів

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.09.2025 р.	
2	Енергетичний комплекс України: роль, виклики та концептуальні основи інтегрального оцінювання енергетичної ефективності регіонів	29.09.2025 р.	
3	Теоретико-методологічні основи оцінювання енергоефективності регіональних енергетичних комплексів	13.10.2025 р.	
4	Кількісна оцінка енергоефективності регіонів України: бенчмаркінг та формування рейтингу	27.10.2025 р.	
5	Результати оцінювання показників енергоефективності регіонів України	10.11.2025 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	24.11.2025 р.	
7	Оформлення додатків	02.12.2025 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	05.12.2025 р.	

Дата видачі завдання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_

Анастасія МІРОШНІЧЕНКО

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 124 с., 18 рис., 25 табл., 29 джерел

**Мірошніченко А. М. Інтегральне оцінювання енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України . – Рукопис.**

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2025 р.

Кваліфікаційна робота присвячена розробленню інтегрального інструментарію оцінювання рівня енергетичної ефективності регіональних енергетичних комплексів України. Проаналізовано роль та системні виклики функціонування паливно-енергетичного комплексу в умовах високої енергетичної залежності. Обґрунтовано необхідність переходу від розрізненого аналізу до комплексної оцінки, здатної враховувати технологічні, економічні та екологічні фактори.

Практична цінність роботи полягає у впровадженні інструментів багатовимірної статистики та машинного навчання, зокрема методу головних компонент та таксонометричного індикатора. Це дало змогу звести одинадцять вихідних індикаторів до трьох факторів (виробничо-енергетичний, екологічно-інвестиційний та технологічно-стійкісний), а також об'єктивно ранжувати територіальні громади за рівнем енергетичної безпеки, ідентифікувавши громади-лідери та громади-аутсайдери.

Результати роботи можуть слугувати емпіричною основою для органів місцевого самоврядування та державної влади при пріоритезації інвестицій та розробленні диференційованих програм модернізації енергетичної інфраструктури.

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА РЕГІОНІВ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНТЕГРАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ, ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ, РЕГІОНАЛЬНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС, ТАКСОНОМЕТРИЧНИЙ ІНДИКАТОР

## ABSTRACT

Qualification thesis: 124 p.; 18 fig.; 25 tables; 29 sources

**Miroshnichenko A.M. Integrated assessment of energy efficiency of regional energy complexes in Ukraine. - Manuscript.**

Qualification Thesis for the Second (Master's) level of Higher Education in Specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of the Educational Program "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University; Kropyvnytskyi, 2025.

The qualification thesis is dedicated to developing an integral methodology (or integral toolkit) for assessing the level of energy security and energy efficiency of regional energy complexes in Ukraine. The role and systemic challenges of the functioning of the fuel and energy complex under conditions of high energy dependence were analyzed. The necessity of transitioning from fragmented analysis to a comprehensive assessment capable of taking into account technological, economic, and environmental factors is substantiated.

The practical value of the work lies in the implementation of multivariate statistics and machine learning tools, particularly the Principal Component Analysis method and a Taxonomic Indicator. This allowed for the reduction of eleven initial indicators to three underlying factors (production and energy, environmental and investment, and technological stability), as well as the objective ranking of territorial communities based on their level of energy security, identifying both leading and outsider communities.

The results of the work can serve as an empirical basis for local self-government bodies and state authorities when prioritizing investments and developing differentiated modernization programs for the energy infrastructure.

ENERGY SECURITY OF REGIONS, ENERGY EFFICIENCY,  
INTEGRAL ASSESSMENT, FACTOR ANALYSIS, REGIONAL ENERGY  
COMPLEX, TAXONOMIC INDICATOR

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ: РОЛЬ, ВИКЛИКИ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ.....	12
1.1. Актуальність та роль енергетичного комплексу в розвитку України.....	12
1.2. Ідентифікація та аналіз ключових детермінант нестійкого функціонування енергокомплексу.....	16
1.3. Аналіз інструментально-методичного апарату оцінювання рівня енергетичної ефективності регіону.....	24
1.4. Методичні основи застосування факторного аналізу для агрегування показників енергетичної безпеки.....	35
Висновки до розділу 1 .....	40
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ .....	42
2.1. Порівняльний аналіз світових та вітчизняних методик оцінювання енергетичної ефективності.....	42
2.2. Методи аналізу складних багатофакторних систем для інтегральної оцінки.....	52
Висновки до розділу 2.....	65
РОЗДІЛ 3. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ: БЕНЧМАРКІНГ ТА ФОРМУВАННЯ РЕЙТИНГУ.....	67
3.1. Бенчмаркінг та формування рейтингу енергоефективності регіонів України .....	67
3.2. Розробка системи індикаторів та порогових значень для оцінки енергетичної ефективності регіону.....	71

3.3. Аналіз енергоефективності та енергетичної ефективності регіону (на прикладі Кіровоградської області).....	79
Висновки до розділу 3 .....	89
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ.....</b>	<b>91</b>
4.1. Інтервально-кластерний підхід до оцінки енергоефективності територіальних одиниць.....	91
4.2. Аналіз структури споживання енергоресурсів та соціально- економічних індикаторів у житловому секторі (2017–2021 рр.).....	97
4.3. Оцінка впливу соціально-економічного потенціалу та демографічного навантаження на енергоефективність регіону.....	102
Висновки до розділу 4 .....	108
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
ДОДАТКИ.....	117
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	118

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЕБ	– енергетична безпека
ПЕР	– паливно-енергетичні ресурси
РЕК	– регіональний енергетичний комплекс
НВДЕ	– нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
ВДЕ	– відновлювані джерела енергії
ВВП	– валовий внутрішній продукт
ЖКГ	– житлово-комунальне господарство
ПКС	– паритет купівельної спроможності
ФАІ	– факторний аналіз індикаторів
ТГ	– територіальна громада
РСА	– аналіз головних компонент
LDA	– лінійний дискримінантний аналіз
ODEX	– індекс енергоефективності ODYSSEE
HDD	– градусо-доба опалення
AIC	– інформаційний критерій AKAIKE

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку України, в умовах високої енергетичної залежності та євроінтеграційних прагнень, підвищення енергоефективності регіональних енергетичних комплексів (РЕК) є ключовим стратегічним пріоритетом. Критичний рівень зносу основних фондів, що призводить до значних втрат енергоресурсів, а також висока енергоємність валового внутрішнього продукту, яка суттєво перевищує показники країн Європейського Союзу, підтверджують необхідність негайних і системних змін. Традиційні методи оцінки, що ґрунтуються на розрізненому аналізі окремих галузевих чи фінансових показників, не дають цілісної картини ефективності використання ресурсів і не дозволяють визначити синергетичний ефект від впровадження енергоощадних заходів.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю розроблення та практичного впровадження інтегрального інструментарію кількісної оцінки енергоефективності на регіональному рівні. Це забезпечить об'єктивний бенчмаркінг, типізацію територіальних громад та обґрунтування диференційованих управлінських рішень у сфері енергетичного менеджменту та інвестиційної політики. Це відповідає як національній стратегії енергозбереження, так і фаховій проблематиці спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», оскільки підвищення енергоефективності є прямим наслідком технічної модернізації та оптимізації роботи електроенергетичних систем.

*Мета дослідження* – розроблення та апробація науково-методичного підходу до інтегрального оцінювання рівня енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України на основі методів багатовимірної статистики та світових практик.

*Об'єкт дослідження* – процес функціонування та управління енергоефективністю регіональних енергетичних комплексів.

*Предмет дослідження* – сукупність теоретико-методичних положень та прикладного інструментарію інтегральної оцінки енергоефективності регіональних енергетичних комплексів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати теоретичні основи та принципи управління енергоефективністю, визначити системні проблеми та чинники, що впливають на раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів на регіональному рівні.

2. Здійснити порівняльний аналіз світових методик оцінювання енергетичної ефективності (ODYSSEE, MEA) та обґрунтувати застосування методів багатофакторного аналізу для оцінки складних регіональних систем.

3. Розробити систему індикаторів та визначити їх порогові значення, що відображають різні аспекти енергоефективності та енергетичної безпеки регіонів.

4. Застосувати метод факторного аналізу (PCA) для зменшення розмірності вихідних індикаторів, виявлення латентних факторів та формування їх змістовної інтерпретації.

5. Виконати інтегральне оцінювання рівня енергоефективності територіальних громад із застосуванням таксонометричного індикатора та здійснити об'єктивний бенчмаркінг регіонів.

6. Проаналізувати структуру споживання енергоресурсів та соціально-економічних чинників у житловому секторі регіонів України для виявлення стійких тенденцій та обґрунтування управлінських пропозицій.

Практична цінність роботи полягає у розробленні та апробації науково-обґрунтованого, комплексного інструментарію, який забезпечує:

- Системну діагностику (об'єктивну кількісну інтегральну оцінку рівня енергоефективності територіальних громад, що дозволяє виявляти не лише проблеми, але й приховані потенціали енергозбереження);

- Прийняття диференційованих рішень (результати ранжування громад за таксонометричним індикатором є готовою емпіричною базою для органів місцевого самоврядування та державної влади. Це дозволяє пріоритезувати інвестиції та розробляти диференційовані програми з термомодернізації та підвищення ефективності електричних і теплових мереж);

- Обґрунтування політики (виділені латентні фактори (виробничо-енергетичний, екологічно-інвестиційний та технологічно-стійкісний) дають чітке розуміння головних рушійних сил стану РЕК, що є основою для формування регіональної політики енергетичного менеджменту та підвищення стійкості енергетичної інфраструктури).

Результати дослідження можуть бути використані в роботі Міністерства енергетики, Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, обласних державних адміністрацій та енергогенеруючих/енергорозподільчих компаній.

# РОЗДІЛ 1

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ: РОЛЬ, ВИКЛИКИ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ

### 1.1. Актуальність та роль енергетичного комплексу в розвитку України

В умовах високої енергозалежності національної економіки України, питання функціонування та розвитку регіональних енергетичних комплексів (РЕК) набувають стратегічного значення. Забезпечення енергетичної безпеки як на державному, так і на регіональному рівнях є життєво необхідним пріоритетом, що безпосередньо впливає на інтереси громадян, підприємств усіх форм власності та адміністративно-територіальних одиниць.

Територіальна енергетична політика, як складова загальнодержавної енергетичної стратегії, повинна обов'язково враховувати специфіку регіонів, зокрема їхній наявний енергетичний потенціал та особливості його використання. Отже, функціонування РЕК має ґрунтуватися на принципах енергетичної безпеки, які традиційно включають [1-2]:

- енергетичну незалежність (мінімізація залежності від імпорту);
- стійкість і стабільність функціонування енергокомплексу (забезпечення безперебійності);
- здатність до саморозвитку та прогресу (модернізація та впровадження інновацій).

На жаль, сьогодні в Україні жодна з цих складових не є повністю забезпеченою, а більшість регіонів не досягли енергетичної самодостатності. Ця ситуація вимагає формування інноваційної економічної парадигми, де ключовою ідеєю стає концепція енергозбереження та підвищення енергоефективності.

Для ефективного управління РЕК та реалізації політики енергозбереження, необхідним є перехід від розрізненого аналізу окремих

показників до комплексної, інтегральної оцінки енергоефективності. Цей підхід дозволяє [1-4]:

- системно врахувати взаємозв'язок технічних, економічних та екологічних факторів, що впливають на використання енергоресурсів у регіоні;
- визначити слабкі ланки в системі виробництва, транспортування та кінцевого споживання енергії;
- обґрунтувати пріоритетні напрями інвестицій в енергозберігаючі заходи та модернізацію;
- порівняти рівень ефективності різних регіональних комплексів.

Актуальність інтегрального оцінювання посилюється потребою у створенні об'єктивного інструменту моніторингу прогресу в досягненні національних та європейських цілей щодо скорочення енергоспоживання.

Проблеми паливно-енергетичного сектору та забезпечення його стійкості є об'єктом пильної уваги багатьох вітчизняних дослідників як у галузевому, так і в регіональному вимірах. Дослідженню тенденцій, викликів та перспектив розвитку енергетики України, зокрема питанням оптимізації ПЕК та впровадження новітніх технологій, присвячені праці провідних фахівців у сфері енергетики та економічної безпеки.

Регіональні аспекти вдосконалення механізмів функціонування енергетичної інфраструктури, включаючи розробку регіональних стратегій та механізмів управління, знайшли своє відображення у дослідженнях відомих науковців-регіоналістів. Безперервні та активні дискусії щодо цієї фундаментальної проблеми серед наукових кіл, урядовців та політиків на всіх рівнях підтверджують її беззаперечну актуальність та пріоритетність у контексті регіонального розвитку.

Особливої гостроти проблема гарантування енергетичної безпеки набуває у зв'язку з євроінтеграційними прагненнями України та необхідністю її входження до світового економічного простору. Подолання економічних труднощів, спричинених трансформаційними процесами, вимагає

застосування нетрадиційних підходів до споживання критично важливих ресурсів, зокрема паливно-енергетичних.

Замість екстенсивного шляху розвитку (збільшення обсягів споживання та виробництва), яким національна економіка рухалася десятиліттями, енергетична галузь має перейти до інтенсивного розвитку, що базується на ефективному забезпеченні сталого розвитку. Відповідальність за постачання ключових енергоносіїв (палива, природного газу, інших видів енергії) та сировинних ресурсів для промисловості покладається на ПЕК України.

Надійне функціонування промислового, аграрного секторів, інших галузей економіки та житлово-комунальної сфери потребує випереджаючого розвитку енергетичної інфраструктури. З огляду на це, основними векторами забезпечення енергетичної безпеки держави мають стати сталий розвиток ПЕК (забезпечення надійності та екологічності); ефективне використання енергії шляхом впровадження енергозберігаючих та екологобезпечних технологій у виробничій та побутовій сферах; головні принципи, які визначають державну політику у сфері енергетичної безпеки, включають:

1) надійність та безперервність постачання (Availability & Security):

Суть: Забезпечення безперебійного постачання енергоресурсів (газу, електроенергії, вугілля) для всіх споживачів.

Передбачає: Підвищення ефективності функціонування Об'єднаної енергосистеми України та гарантування безпеки постачання.

2) доступність (Affordability):

Суть: Економічна обґрунтованість цін на енергоресурси для населення та промисловості, запобігання енергетичній бідності.

3) Диверсифікація джерел та шляхів (Diversification):

Суть: Зменшення залежності від одного постачальника чи одного типу енергоресурсів.

Передбачає: Інтеграцію енергетичних ринків до європейських ринків та розвиток власних традиційних і нетрадиційних покладів вуглеводнів.

4) Енергоефективність та енергозбереження (Efficiency):

Суть: Раціональне використання енергії та зменшення енергоємності ВВП.

Передбачає: Стимулювання енергоефективних заходів та залучення інвестицій для впровадження інноваційних технологій.

#### 5) Екологічність (Environmental Stewardship):

Суть: Зменшення негативного впливу енергетичного сектору на довкілля.

Передбачає: Розвиток відновлюваних та низьковуглецевих джерел енергії (ВДЕ) та альтернативних видів палива.

#### б) Розвиток конкуренції та демонополізація:

Суть: Впровадження ефективних правил діяльності та розвиток конкуренції на енергетичних ринках.



Рисунок 1.1. Принципи енергетичної безпеки України

Поточний рівень адаптації енергетичного комплексу до імперативів енергозахищеності залишається неприпустимо низьким [5], що стає серйозною перешкодою на шляху стабілізації та розвитку всього господарського комплексу.

Україна визнана енергодефіцитною країною, оскільки покриває попит на ПЕР за рахунок власних джерел менше ніж на 50%. При цьому вітчизняна промисловість демонструє надмірну енергоємність — питомі витрати енергії на одиницю валового внутрішнього продукту (ВВП) в Україні в кілька разів перевищують аналогічні показники європейських держав. Однією з основних причин такої високої енергоємності є структурні особливості української економіки, яка значною мірою складається з енергомістких галузей (металургія, хімічна промисловість, машинобудування), а також застарілість основних фондів та низька культура енергоспоживання.

Висока енергоємність економіки обумовлена не лише структурою, а й істотним технологічним відставанням значної частини промислового комплексу та житлово-комунального господарства (ЖКГ), а також критичним рівнем зношення основних фондів [6-7]. На разі, рівень енергоємності виробництва на підприємствах України часто коливається від 10% до 80%, при середньому значенні близько 25%. Така ситуація є прямим наслідком:

- домінування важкої промисловості, що апріорі характеризується високою енергомісткістю продукції;
- відсутності відчутних позитивних результатів від реструктуризації паливно-енергетичної промисловості, спрямованої на пріоритетне використання вітчизняних енергоносіїв;
- поширеного використання застарілих та енерговитратних технологій;
- понаднормативного фізичного спрацювання основних виробничих засобів.

Для подолання цих системних проблем необхідний комплексний підхід, який починається з точного та інтегрального оцінювання ефективності використання енергоресурсів на регіональному рівні.

## **1.2. Ідентифікація та аналіз ключових детермінант нестійкого функціонування енергокомплексу**

Трансформаційні процеси, що відбуваються в Україні протягом

останніх десятиліть, спричинили глибоку економічну кризу. Подолання цієї кризи вимагає впровадження нетрадиційних підходів та методів, особливо у сфері споживання ключових ресурсів, зокрема й паливно-енергетичних(ПЕР). Україна залишається енергодефіцитною країною, оскільки задовольняє свої потреби в ПЕР за рахунок власних джерел менше ніж на 50%.

Проблеми функціонування енергетичного комплексу регіонів поглиблюються через відсутність належного теоретико-методологічного підґрунтя, зокрема, розроблених методичних підходів для формування стратегії і механізму його розвитку. Саме тут інтегральне оцінювання енергоефективності набуває вирішального значення.

Економія ПЕР – це реалізація сукупності пріоритетних ідей, принципів та заходів, спрямованих на зменшення енергоемності виробництва та раціональне використання ресурсів, запобігання непродуктивному використанню та безконтрольній експлуатації обмеженого ресурсного потенціалу.

Слід розрізняти два ключові аспекти потенціалу енергозбереження (див. табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Ключові аспекти потенціалу енергозбереження

Вид потенціалу	Визначення
Теоретичний (технічний)	Максимально можливе енергозбереження за умови повного використання всіх відомих на даний момент енергозберігаючих заходів та технологій.
Економічно доцільний	Відсоток теоретичного потенціалу, що генерує чистий прибуток.

Класифікація потенціалу може здійснюватися за різними ознаками: галузевий (промисловість, ЖКГ), територіальний (регіони), за джерелом енергії (електроенергія, тепло) або за типом втрат (технологічні, нетехнологічні).

Висока ступінь енергозалежності та поточний стан паливно-енергетичного сектору обумовлюють стратегічну необхідність впровадження до енергетичного обігу інноваційних рішень. Ключовим напрямом є використання нетрадиційних та відновлюваних енергетичних технологій

(НВДЕ), включаючи потенціал сонячної радіації, вітрової енергетики, геотермальних ресурсів та інших аналогічних джерел. Це є частиною стратегії підвищення стійкості та енергетичної безпеки регіонів.

На сучасному етапі розвитку енергетичної політики термін «енергозбереження» трактується як багатоаспектний комплекс заходів (рис.1.2) , який виходить за межі простої економії ресурсів.

Він охоплює дві ключові складові: заходи з раціоналізації та економії традиційних енергетичних ресурсів, а також активне залучення до енергетичного обігу НВДЕ.

Доцільно наголосити, що потенціал НВДЕ на сьогодні залишається недостатньо реалізованим у господарській діяльності більшості регіонів, що визначає актуальність їх пріоритетного впровадження.

Однак, з огляду на необхідність інтенсивного використання НВДЕ (сонячна, вітрова, біомаса), які за своєю природою мають здатність до відновлення, ставити питання лише про «економію енергії» є не зовсім коректним. Навпаки, ці джерела слід інтенсивно вводити в енергетичний баланс.

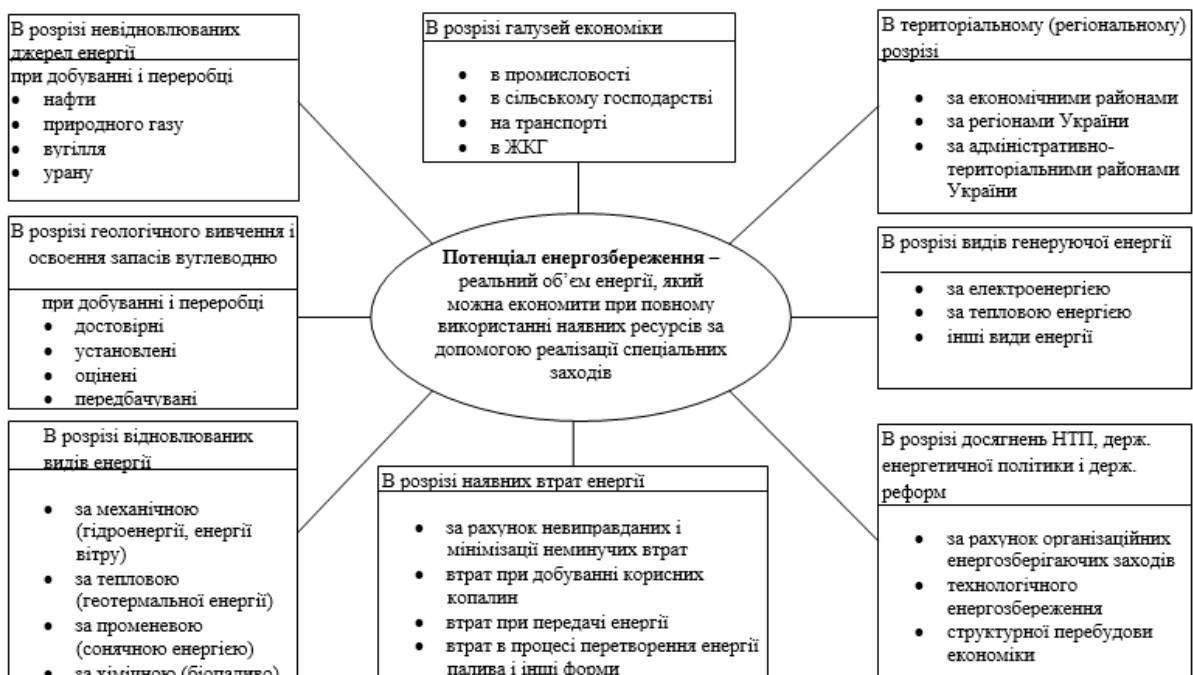


Рисунок 2.1 - Диференціація потенціалу енергозбереження за галузями (споживачами) та типами джерел

У контексті забезпечення довгострокової енергетичної безпеки доцільним є використання більш точного та стратегічно перспективного поняття — «раціональне використання енергії». Ця концепція охоплює чотири ключові напрями для досягнення поставлених цілей:

1. Оптимізація структури споживання: Скорочення використання традиційних палив та енергії шляхом модифікації методів і структури господарської діяльності.

2. Структурна диверсифікація: Заміщення дефіцитних енергоресурсів (наприклад, природного газу та нафти) менш дефіцитними (зокрема, вугіллям та атомною енергією), що є тактичним елементом диверсифікації.

3. Інтенсифікація застосування НВДЕ: Розширення сфери застосування та підвищення інтенсивності використання НВДЕ, як-от потенціал сонячної радіації, вітрової генерації, ресурси біомаси тощо.

4. Загальне підвищення рівня енергетичної ефективності: Досягнення максимальної ефективності використання всіх наявних енергоресурсів через комплексне впровадження нормативно-правових, організаційно-економічних та технологічних заходів.

Проблема раціонального використання ПЕР (паливно-енергетичних ресурсів) має визначальний характер для стабілізації економіки України, зниження економічної вразливості через залежність від зовнішніх джерел енергії та підвищення стійкості систем життєзабезпечення суспільства.

Однак, ефективна реалізація цього стратегічного шляху є неможливою без дієвої та сталої державної підтримки.

Зважаючи на обмеженість природно-ресурсного потенціалу країни, виправданим є перехід від вузької категорії "енергозбереження" до ширшої та більш всеосяжної категорії — енергоресурсозбереження.

Концепція енергоресурсозбереження дозволяє створити комплексний підхід до вирішення проблеми енергоефективності, оскільки фокусування виключно на простій економії енергії не охоплює всієї глибини питання.

Суттєве зниження енергоємності валового внутрішнього продукту (ВВП) можливе лише за умови оптимального поєднання двох ключових груп чинників:

1) Техніко-технологічні та управлінські інновації: Впровадження управлінських ноу-хау та передових технологій на всіх етапах циклу — від видобутку ПЕР (паливно-енергетичних ресурсів) до їх кінцевого споживання. Лише такий синергетичний ефект здатен забезпечити економічну доцільність та успішність реалізації загальнодержавної стратегії енергозбереження в Україні.

2) Системні фактори впливу: Ґрунтовне дослідження дозволяє ідентифікувати та встановити ключові макро- та мікроекономічні чинники, які найбільш суттєво детермінують функціонування та перспективи розвитку регіонального енергетичного комплексу (РЕК).

Таблиця 1.2 - Системні фактори впливу РЕК регіону

Фактор	Сутність впливу
Фактор надійного енергозабезпечення	Здатність РЕК гарантувати необхідний обсяг і якість постачання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), що є визначальним для стабільного функціонування промислового сектору та забезпечення прийняттого рівня життєдіяльності населення.
Фактор стійкості	Резистентність регіонального енергетичного комплексу загроз (економічних, техногенних, природних) та його потенціал мінімізації збитків від будь-яких дестабілізуючих впливів (вразливостей).
Фактор ефективності ПЕР-використання	Потенціал споживачів та господарської системи регіону до раціонального використання ПЕР, що передбачає повну реалізацію наявного потенціалу енергоресурсозбереження та уникнення нераціональних суспільних витрат.
Фактор енергетичної незалежності	Спроможність паливно-енергетичного комплексу гарантовано задовольнити мінімальні потреби регіону в енергоресурсах навіть за умови обмежень чи перебоїв у зовнішніх або внутрішніх поставках.

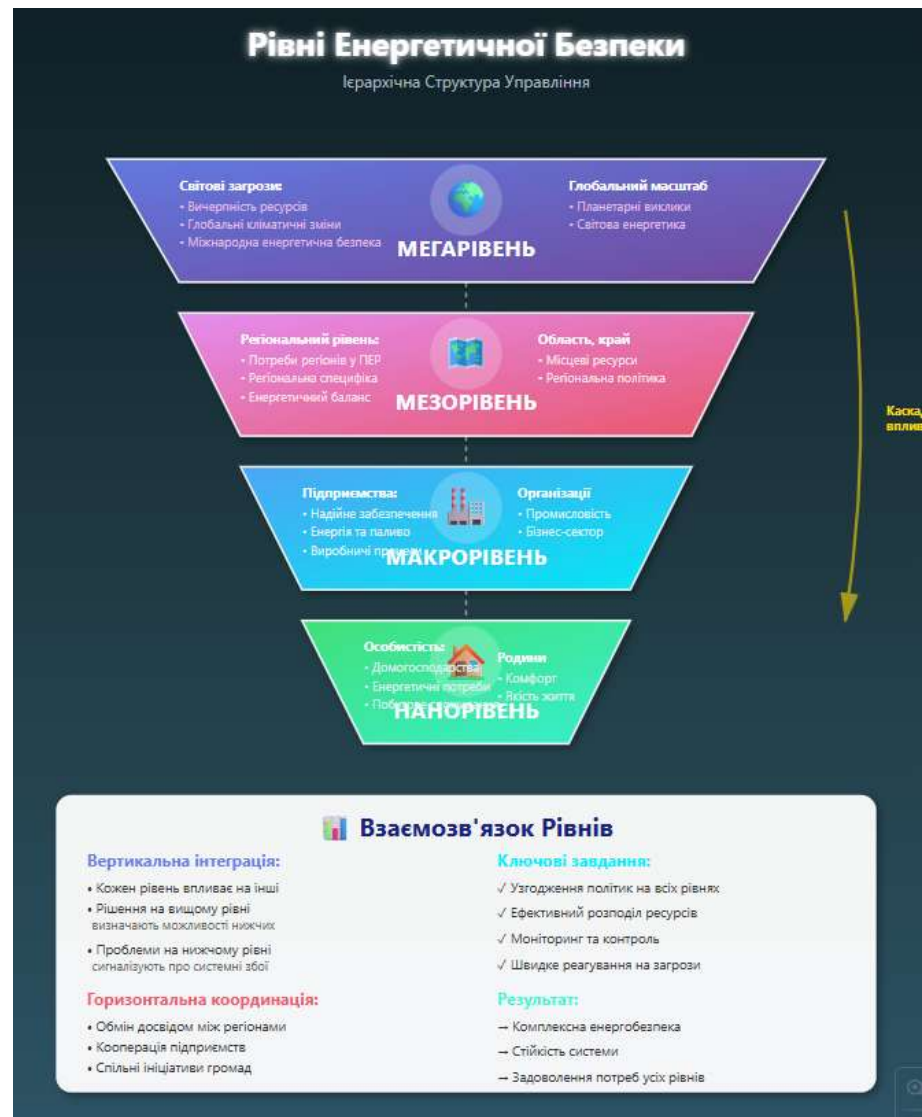


Рисунок 1.2 – Ієрархічна структура управління за рівнями енергетичної безпеки країни

Аналіз теоретичних положень свідчить, що в сучасній науці існує орієнтація переважно на вивчення енергетичної безпеки на макрорівні (держава в цілому), що недостатньо для комплексної картини.

Для підвищення ефективності управління, важливо актуалізувати важливість дослідження енергетичної безпеки на всіх рівнях (див. рис. 1.2).

Кожен із компонентів енергетичної системи відіграє вирішальну роль у формуванні загального рівня національної безпеки держави. Виняткове стратегічне значення енергетичної галузі обумовлює імператив (або стратегічну необхідність) формування державної політики на основі

системного підходу до формування політики, що спрямована на підтримку визначеного порогового рівня енергетичної безпеки.

Таким чином, завдання, пов'язані з енергозбереженням та підтриманням енергетичної безпеки, прямо інтегровані в систему пріоритетів економічної та національної безпеки, витікаючи безпосередньо з ключових засад останньої.

На основі вищезазначених стратегічних передумов, до основних проблем функціонування та перспективного розвитку енергетичного комплексу регіону належать:

- *Фізичне та моральне зношення основних фондів:*
  - Високий ступінь зносу енергогенеруючого обладнання (ТЕЦ, ГЕС, котелень) та мережевої інфраструктури (ЛЕП, підстанцій).
  - Необхідність значних капіталовкладень на модернізацію та заміну.
- *Технологічна відсталість:*
  - Використання застарілих, низькоефективних технологій генерації та передачі енергії, що призводить до надмірних втрат.
    - *Низька оперативність та гнучкість енергосистеми.*
  - *Вузькі місця в мережевій інфраструктурі:*
    - Недостатня пропускна спроможність мереж, особливо для інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).
      - Проблеми з надійністю та якістю електропостачання у віддалених або сільських районах.
- *Екологічні проблеми:*
  - Значні викиди парникових газів та забруднюючих речовин від традиційної теплової генерації.
    - Проблеми утилізації відходів (золи, шлаків).
- *Проблеми ресурсної бази:*
  - Залежність від імпортованих чи вичерпних видів палива (газ, вугілля).
    - Нестабільність цін на енергоносії.
- *Кадрові проблеми:*

○ Старіння кваліфікованого персоналу та недостатня підготовка нових фахівців у сфері сучасних енергетичних технологій.

До основних факторів розвитку регіонального енергетичного комплексу належать:

#### *1. Економічні Фактори*

- Інвестиційний клімат (привабливість регіону для приватних та іноземних інвестицій у енергетичні проєкти);
- Тарифна політика (обґрунтованість тарифів для споживачів та виробників, що впливає на платоспроможність і рентабельність);
- Рівень енергоємності ВВП (загальна ефективність використання енергії економікою регіону);

#### *2. Політико-правові та регуляторні фактори*

- Державна енергетична політика (наявність та ефективність регіональних програм розвитку енергетики, відповідність їх національній стратегії);
- Законодавче регулювання (спрощеність процедур земельних відведень, підключення до мереж для нових об'єктів (особливо ВДЕ));
- Геополітичний фактор (безпека постачання енергоносіїв, військово-політичні ризики).

#### *3. Технологічні та інноваційні фактори*

- Розвиток ВДЕ (потенціал та темпи впровадження сонячної, вітрової, біоенергетики).
- Цифровізація (Smart Grid) (впровадження інтелектуальних мереж, систем моніторингу та управління для оптимізації роботи);
- Технології зберігання енергії (наявність та розвиток систем накопичення енергії (ESS) для балансування ВДЕ).

#### *4. Соціальні та природні фактори*

- Споживча поведінка (рівень енергозбереження та енергоефективності серед населення та промисловості);

- Природно-кліматичні умови (наявність ресурсів (сонце, вітер, вода) для ВДЕ та вплив кліматичних змін на інфраструктуру (повені, обмерзання)).



Рисунок 1.2 – Концептуальна схема детермінант розвитку ПЕК



Рисунок 1.3 - Системний аналіз енергетичного комплексу: взаємозв'язок викликів та пріоритетів розвитку

### 1.3. Аналіз інструментально-методичного апарату оцінювання рівня енергетичної ефективності регіону

Формування ефективної державної стратегії та тактики щодо забезпечення енергетичної безпеки (ЕБ) ґрунтується на двох ключових елементах:

- 1) визначення поточного рівня безпеки (виявлення та систематизація

загроз, які можуть негативно вплинути на цей рівень. Саме тому оцінка рівня ЕБ є критично важливою проблемою в управлінні енергетичним комплексом).

2) *ідентифікація та систематизація загроз енергетичній безпеці* (перший крок у виборі стратегічних рішень – це ідентифікація і систематизація існуючих та потенційних загроз ЕБ регіону для різних сценаріїв розвитку).

У вигляді табл.1.4 подамо систематизовані п'ять основних груп можливих загроз ЕБ держави.

Таблиця 1.4 - Систематизація ключових загроз (ризиків), що детермінують рівень енергетичної захищеності

Група загроз	Приклади
Економічні	Надмірна енергоємність національної економіки, нестабільність (або висока волатильність) цін на ПЕР, недостатня диверсифікація джерел енергопостачання, хронічний дефіцит інвестиційних ресурсів для модернізації
Соціально-політичні	Прояви громадської активності антиенергетичного спрямування, виникнення трудових конфліктів, загрози, пов'язані з диверсійними діями та терористичними актами проти енергетичної інфраструктури.
Техногенні	Виникнення надзвичайних подій (аварій, вибухів, та пожеж), що мають антропогенно-техногенний генезис, безпосередньо на критичних об'єктах ПЕК або на суміжних об'єктах інших галузей промисловості.
Природні	Вплив стихійних лих, аномально суворих кліматичних умов (зокрема, перевищення нормативних температурних режимів у зимовий період)..
Управлінсько-правові	Системні прорахунки в реалізації економічної політики, неповнота (або колізійність) управлінських рішень, низька ефективність державної політики у сфері енергозбереження та регулювання.

Варто відзначити, що до економічних загроз належать не лише загальноекономічні фактори, але й дестабілізуючі фактори та диспропорції виробничо-економічного характеру, які створюють небезпеку для надійного та бездефіцитного енергопостачання.

У контексті сучасної енергетичної парадигми України та прогнозного періоду, критично важливе значення для забезпечення стійкості енергопостачання набувають ризики, що переважно локалізуються в економічній та управлінсько-правовій сферах (або регуляторно-правовому полі). Цей факт підтверджує критичну важливість проведення ґрунтовного дослідження ефективності як управлінських рішень, так і процесів енерговикористання.

Перелік загроз є лише початковим етапом аналізу. Ключовим завданням є ідентифікація фактичних та очікуваних загроз, що включає встановлення їхньої інтенсивності, форми прояву та ступеня наближення до гранично допустимого рівня (порогових значень).

Кількісне відображення цієї інформації здійснюється за допомогою двох взаємопов'язаних механізмів:

1. Система показників (індикаторів): Формування системи індикаторів ЕБ, які агреговано відображають різноманітні аспекти функціонування систем постачання та споживання ЕЕ.

2. Порівняльний аналіз: Зіставлення фактичних значень індикаторів із гранично допустимими (пороговими) значеннями, які слугують інформаційною базою для прийняття управлінських рішень.

Критично важливим для гарантування та діагностики енергетичної безпеки (ЕБ) регіону є застосування спеціалізованого методичного інструментарію, до якого належать систематичний моніторинг та комплексний індикативний аналіз стану енергетичної безпеки.

Моніторинг ЕБ — це сукупність операцій, що охоплюють систематичне спостереження, реєстрацію, діагностику та аналіз процесів в енергетиці та енергоспоживанні, які безпосередньо впливають на рівень безпеки. Його

основна мета полягає в ідентифікації загроз, оцінці поточного та очікуваного рівнів безпеки, а також у підготовці інформації для обґрунтування управлінських рішень.

Головні завдання моніторингу ЕБ:

- Ґрунтовний аналіз, спрямований на встановлення номенклатури (або структури), першоджерел (або генезису), типологічної специфіки та рівня критичності (або інтенсивності) існуючих загроз.
- Оцінка (діагностика) існуючого та прогнозованого рівнів ЕБ.
- Підготовка інформації для обґрунтування та вибору найбільш ефективних заходів щодо нейтралізації виявлених загроз.

На основі сформульованих функціональних завдань, архітектура системи моніторингу логічно структурована та включає два суттєво взаємопов'язані блоки, які забезпечують її цілісне функціонування (див. рис. 1.4):

- Інформаційний блок: забезпечує відстеження та збір показників.
- Аналітичний блок: забезпечує індикативний аналіз рівнів енергетичної ефективності на основі бази оцінювання (індикаторів та інтегральних показників).

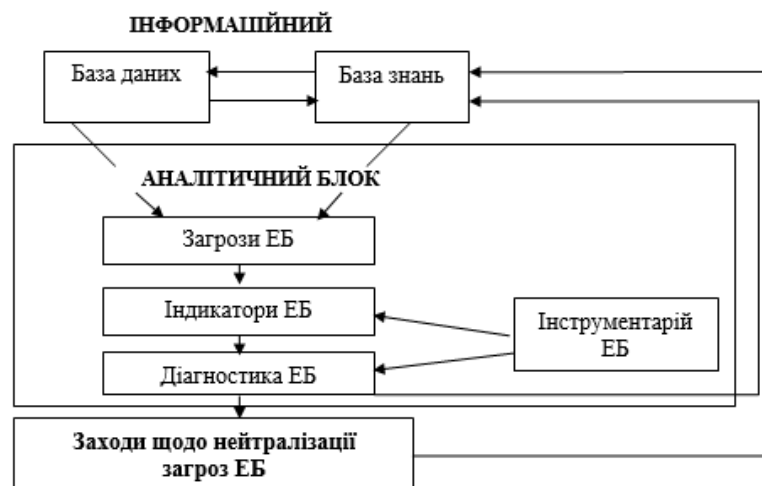


Рисунок 1.4 – Архітектура системи моніторингу енергетичної стійкості (захищеності) регіону

Огляд чинних методик і підходів до діагностики стану ЕБ демонструє їхню фундаментальну спільність, яка визначається наступними ключовими елементами):

- Застосування валідованої системи показників (індикаторів), що комплексно характеризують різні аспекти ЕБ.
- Нормуванні цих показників.
- Порівнянні їхніх поточних або прогнозних значень з граничними (пороговими) величинами.
- Застосуванні згорнутих інтегральних показників для узагальнення.

Саме ця методологічна основа є вирішальною для Вашої роботи, оскільки інтегральне оцінювання енергоефективності (як невід'ємної складової ЕБ) вимагає ретельного вибору та коректного агрегування таких індикаторів

Для забезпечення наукової обґрунтованості та практичної значущості, індикативний аналіз ЕБ повинен ґрунтуватися на низці фундаментальних принципів.

Найбільш вагомі принципи, що безпосередньо стосуються методології оцінювання, включають:

- Принцип комплексності: Вимагає аналізу всіх аспектів об'єктів і сфер, які потенційно генерують загрози ЕБ.
- Принцип варіантності (альтернативності): Передбачає обґрунтування множини можливих сценаріїв розвитку об'єктів ЕБ (динаміки індикаторів) для розробки адекватних захисних заходів.
- Принцип врахування ієрархічності: Забезпечує специфічний підхід до аналізу ЕБ відповідно до різних рівнів територіального поділу (національний, регіональний, локальний).
- Принцип забезпечення інформацією (якість/кількість): Вимагає збору актуальної, достовірної, повної та релевантної інформації, необхідної для відображення фактичного стану досліджуваного об'єкта.

- Принцип порівнянності: Означає можливість зіставлення стану різних територіальних утворень (регіонів) на базі єдиної методології та ідентичного кола включених показників.
- Принцип забезпечення єдності всіх аспектів аналізу: Вимагає поєднання як опису ситуації на задану дату (статичний зріз), так і аналізу стану ЕБ у часовому розрізі (динамічний аналіз тенденцій).
- Принцип періодичного перегляду порогових значень: Передбачає регулярне коригування гранично допустимих показників на основі колективного експертного аналізу, зважаючи на зміни фінансових можливостей та суспільних потреб.

Система моніторингу ЕБ є органічною частиною загальної системи моніторингу економічної безпеки. Система повинна бути інтегрована у комплексний моніторинг макросередовища, що охоплює усю сукупність економічних, соціальних та екологічних (природних) чинників і процесів (рис. 1.5).

Система моніторингу передбачає інтеграцію індикаторного методу оцінки ЕБ, в якому можна виділити наступні цінні аспекти, що стосуються розробки інтегрального показника:

- виділення інформаційного та аналітичного процесу (аналітичний процес включає індикативний аналіз, який базується на визначенні загроз і лише потім на формуванні відповідних показників-індикаторів);
- взаємодія знань та даних (визначена взаємодія між банками знань (теоретичні основи, експертні оцінки, методики) і банками даних (статистична інформація, фактичні показники));
- особлива роль заходів (акцентовано увагу на ролі заходів з нейтралізації загроз та діагностиці загроз надійному енергозабезпеченню у поповненні бази знань (зворотний зв'язок)).

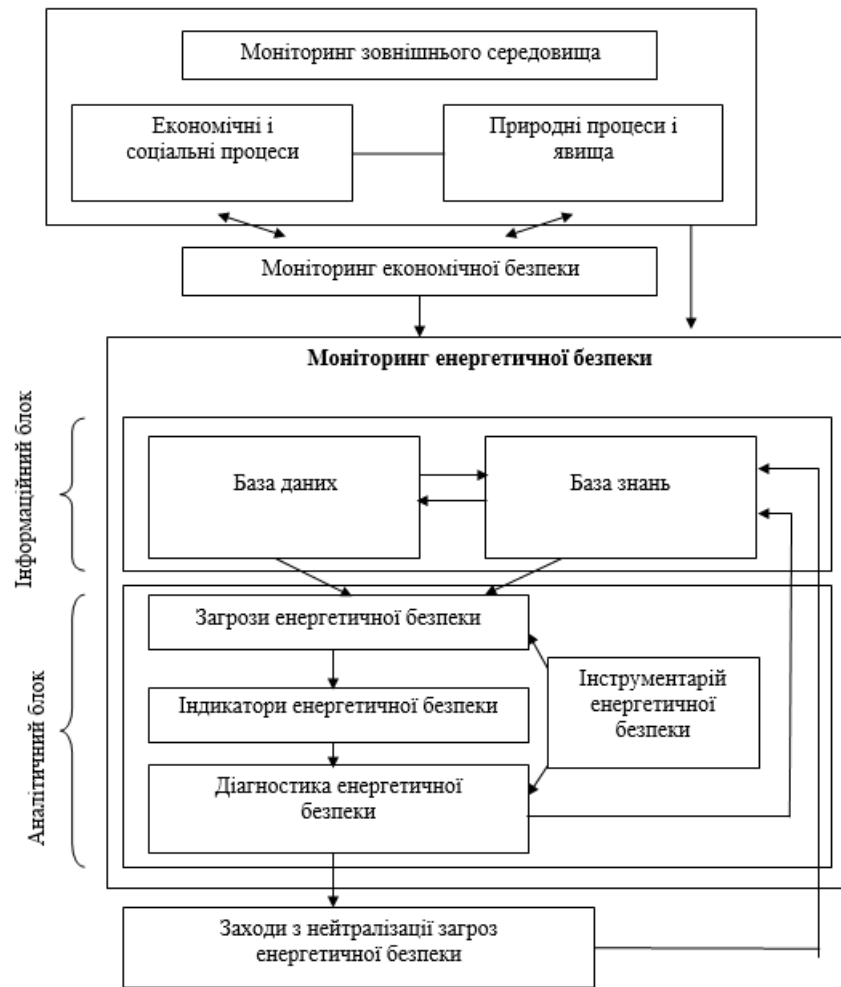


Рисунок 1.5 - Ієрархічна структурна модель системи моніторингу енергетичної безпеки регіону

Інструментарій моніторингу ЕБ охоплює:

- процедура формування сукупності індикаторів, адаптованих для різних територіальних ієрархічних рівнів та інтерпретованих у часовому розрізі (динаміка показників);
- технологію ранжування регіонів за умовами ЕБ (що особливо важливо для твоєї роботи);
- оцінку внеску енергетичного фактора в економічну безпеку;
- діагностика рівня гарантованості забезпечення регіональних підсистем ПЕР, імплементована з обов'язковим врахуванням впливу факторів ризику та операційної невизначеності.

Ці методологічні підходи є прямою основою для розробки

інтегрального оцінювання енергоефективності регіонів, оскільки енергоефективність є ключовим індикатором, що впливає на більшість зазначених загроз (економічних, управлінсько-правових).

Формування системи індикаторів має ґрунтуватися на властивостях великих систем, що забезпечують її системність та надійність:

- ієрархічність та наявність підсистем;
- динамічність (здатність відображати зміни в часі);
- надійність та адаптація;
- багатокритеріальність при оцінці ефективності;
- економічність (мінімальні витрати на визначення).

Додатково висуваються специфічні вимоги до індикаторів ЕБ регіону, які підкреслюють важливість інтегрального підходу (див. табл.1.5). Система індикаторів формується на основі системного підходу, відображаючи структуру і функціонування ЕК. Вона розглядається як єдине ціле, що складається з підсистем (блоків) і сама є підсистемою в рамках економічної безпеки.

Таблиця 1.5 - Принципи та критерії формування системи індикаторів регіональної енергетичної безпеки

№ з/п	Основний принцип (вимога)	Критерій реалізації (зміст вимоги)
1	Релевантність оцінювання (адекватність)	Індикатор повинен бути безпосередньо пристосований для кількісного відображення рівня енергетичної безпеки в межах територіально-адміністративної одиниці (регіону).
2	Самодостатність даних (повнота)	Вимірюваний показник має бути фінальним і не вимагати додаткових проміжних вимірювань або обчислень для своєї інтерпретації.
3	Сенсорна унікальність (ексклюзивність)	Кожен індикатор повинен бути єдиним у своєму роді для опису конкретної характеристики або аспекту енергетичної безпеки, уникаючи дублювання функцій.
4	Надійність вимірювання (точність)	Вимірювані параметри повинні відображати фактичний стан регіону з мінімально можливою похибкою, забезпечуючи високу достовірність даних.

## Продовження таблиці 1.5

№ з/п	Основний принцип (вимога)	Критерій реалізації (зміст вимоги)
5	Змістовна інтерпретація (осмисленість)	Кількісні показники повинні нести чітке смислове навантаження і бути зрозумілими не лише для фахівців, що проводять розрахунки, але й для всіх зацікавлених сторін.
6	Генерація інтегрального індексу (комплексність)	Методологія повинна дозволяти згортання (агрегування) набору індикаторів до єдиного кінцевого кількісного інтегрального показника, зручного для міжрегіонального порівняння та моніторингу динаміки змін.
7	Автономність оцінки (незалежність)	Має бути забезпечена можливість оцінювання стану конкретного регіону абсолютно незалежно від порівняння з іншими подібними територіальними одиницями.
8	Просторово-часова адаптивність (гнучкість)	Метод повинен дозволяти проводити оцінку енергетичної безпеки регіону в будь-який визначений момент часу та на різних етапах його соціально-економічного розвитку.
9	Економічна доцільність (мінімальність Затрат)	Витрати праці, часу та фінансових ресурсів на збір даних та обчислення результатів мають бути мінімальними.
10	Своєчасність результату (оперативність)	Отримання результатів оцінки енергетичної безпеки регіону має здійснюватися у строки, необхідні для швидкого прийняття управлінських рішень.
11	Методологічна еволюція (покращуваність)	Запропонований метод оцінювання повинен залишати можливість для внесення подальших змін, корегувань та удосконалення методики.
12	Формалізація результатів (кількісність)	Кінцеві результати обчислення аналізованих параметрів повинні бути виражені в кількісній формі, що забезпечує їхню математичну обробку та порівняння.
13	Уніфікація підходів (єдність методики)	Застосування аналітичного підходу до оцінки регіональних утворень та в умовах змінних обставин вимагає жорсткого дотримання єдиного, уніфікованого алгоритму. Це забезпечує методологічну порівнянність отриманих результатів та їх репрезентативність.
14	Суспільна корисність (всеосяжність Впливу)	Результати використання методики повинні сприяти позитивним змінам у різних секторах економіки регіонів, що загалом позначається на сталому розвитку суспільства.

## Продовження таблиці 1.5

№ з/п	Основний принцип (вимога)	Критерій реалізації (зміст вимоги)
15	Відсутність двозначності (однозначність критерію)	Для забезпечення об'єктивності та наукової достовірності дослідження, розроблено критеріальну базу комплексного оцінювання ключових чинників впливу, інтегрованих до методологічного апарату.
16	Співставність оцінок (схожість)	Оцінка енергетичної безпеки однакових за характеристиками об'єктів (регіонів) повинна давати ідентичний (схожий) результат.
17	Об'єктивність (повторюваність)	Надійність методики повинна гарантувати ідентичність результатів оцінювання одного й того ж об'єкта (регіону), незалежно від того, виконана вона різними незалежними суб'єктами (експертами) чи в різні часові періоди (за умови сталості вхідних параметрів), що підтверджує її об'єктивність та реплікативність.
18	Системний охоплення (всебічність)	Даний методологічний підхід вимагає забезпечення комплексного охоплення усіх критично значущих ендогенних (внутрішніх) та екзогенних (зовнішніх) чинників, які детермінують стійкість функціонування та стратегічні перспективи розвитку РЕК.
19	Чутливість до змін (сприйнятливність)	Зміна вихідних параметрів, що прийняті для оцінки, повинна призводити до адекватної зміни кінцевого інтегрального результату.
20	Векторність покращення (одноманітність)	Покращення окремих параметрів, що оцінюються, повинно незмінно приводити до покращення кінцевого інтегрального показника енергетичної ефективності регіону.
21	Контроль точності (мін.похибки)	Сукупна похибка, що виникає в процесі оцінювання, повинна бути зведена до мінімуму.
22	Багатоперіодний аналіз (динамічність)	Оцінка результатів діяльності повинна проводитися в динаміці, використовуючи попередні стани та періоди як базові для порівняння.
23	Прогностичний потенціал (моделюємість)	Методологічний апарат повинен забезпечувати можливість ефективного моделювання складних динамічних процесів (або ключових параметрів) функціонування системи, а також прогнозування сценаріїв її перспективного розвитку.
24	Співвідношення витрат/ефекту (результативність)	Очікуваний позитивний ефект (результат) від застосування методики повинен значно перевершувати необхідні витрати на її реалізацію.

Найбільш суттєвими характеристиками ЕК, які мають бути відображені індикаторами, є: забезпеченість ПЕР, гнучкість, маневреність, різноманітність структури, фактичний стан устаткування, надійність, можливість управління, енергетична ефективність та взаємодія з навколишнім середовищем.

Отже, метою кваліфікаційної роботи є підвищення рівня енергоефективності шляхом розробки наукових основ її аналізу, моніторингу та прогнозування. Для візуального відображення стану використовується шкала кризовості, що розділена на інтервали за допомогою порогових значень. Для градації рівня енергетичної захищеності (або стійкості) використовується трирівнева шкала, яка передбачає наступну диференціацію досліджуваного стану на основі кількісних бальних оцінок (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 - Система градації рівнів енергетичної ефективності регіону

Стан (рівень)	Абревіатура	Кількісне значення (Бал)	Сутність
Стан стабільності (Нормальний)	Н	«1»	Відповідає мінімальному рівню ризику (або безпечної зони).
Стан підвищеного ризику (Передкризовий)	ПК	«2»	Сигналізує про наближення до порогових значень.
Стан критичної небезпеки (Кризовий)	К	«3»	Відповідає максимальному (або недопустимому) рівню загрози.

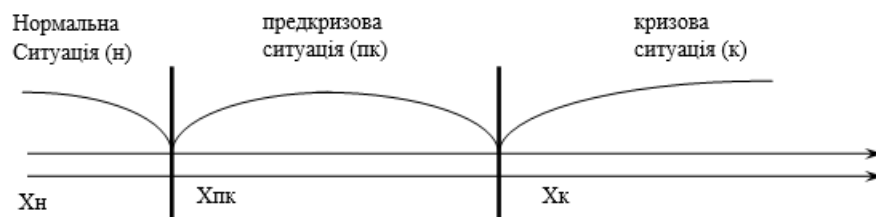


Рисунок 1.6 - Диференціація станів індикаторів енергетичної безпеки (3-рівнева шкала)

8-бальна шкала пропонує більш детальну градацію, розділяючи передкризовий інтервал на три зони (ПКП, ПКР, ПКК) і кризовий – на чотири зони (КН, КЗ, КК, КНЗ) (див. рис. 1.7).

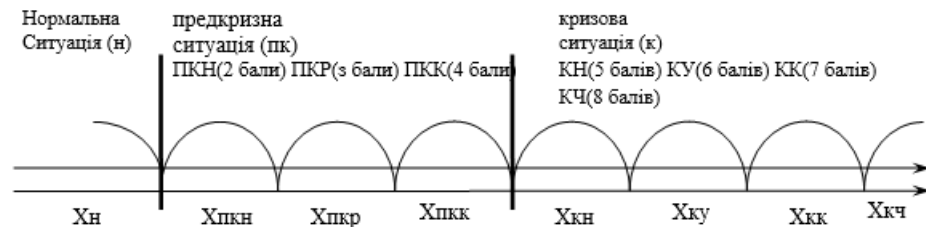


Рисунок 1.7 - Диференціація рівнів стану енергетичної безпеки: 8-бальна градація

На основі експертного аналізу було визначено та систематизовано набір релевантних індикаторів енергетичної безпеки Кіровоградської області. В експертизі брали участь спеціалісти відділів ПЕК та енергозбереження районних адміністрацій Кіровоградської області, а також представники ПрАТ «Кіровоградобленерго».

#### 1.4. Методичні основи застосування факторного аналізу для агрегування показників енергетичної безпеки

Концепція факторного аналізу індикаторів (ФАІ) ґрунтується на припущенні, що спостережувані кореляційні зв'язки між множиною вимірюваних змінних можна пояснити впливом меншої кількості непрямовимірюваних, латентних чи загальних факторів (або індикаторів). Тобто, складна структура взаємозалежностей між емпіричними показниками  $x^{(1)}, \dots, x^{(p)}$  може бути зведена до залежності від меншої групи першопричинних, неспостережуваних величин  $f^{(1)}, \dots, f^{(m)}$ , де  $m < p$ .

Побудова більшості моделей ФАІ передбачає, що ці загальні фактори  $F_j$  є некорельованими між собою (ортогональними). При цьому кожна вихідна

(спостережувана) ознака  $X_i$  не пояснюється виключно загальними факторами. Вважається, що кожна змінна  $X_i$  також залежить від унікальної залишкової випадкової компоненти  $e_i$ , яка називається характерним фактором або специфічною дисперсією. Цей фактор визначає статистичний зв'язок між  $X_i$  та загальними факторами  $F_j$ .

Лінійна модель факторного аналізу для нормованих спостережень може бути представлена у формі:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (1.1)$$

де  $X_i$  —  $i$ -тий спостережуваний (нормований) індикатор (наприклад, показник енергоефективності);

$F_j$  —  $j$ -тий латентний загальний фактор;

$a_{ij}$  — факторне навантаження, що відображає ступінь впливу фактора  $F_j$  на індикатор  $X_i$ ;

$e_i$  — характерний фактор (специфічна компонента), унікальний для  $X_i$ ;

$p$  — кількість спостережуваних індикаторів;

$m$  — кількість спільних факторів ( $m < p$ ).

Головна мета застосування факторного аналізу для оцінки енергетичної безпеки чи енергоефективності полягає у виявленні та змістовній інтерпретації цих латентних загальних факторів. При цьому прагнуть:

1. Мінімізувати кількість цих загальних факторів  $F_j$ .
2. Максимізувати частку дисперсії вихідних індикаторів  $X_i$ , яка пояснюється загальними факторами, та мінімізувати вплив характерних факторів  $e_i$ .

Статистичний аналіз вважається успішним, якщо вдається пояснити великий масив вихідних змінних за допомогою невеликої кількості виявлених латентних факторів.

Факторний аналіз як метод статистичного дослідження регіональних індикаторів енергетичної безпеки/ефективності включає такі ключові етапи:

1. Формулювання мети: визначення цілей дослідження. Вони можуть бути дослідницькими (виявлення та аналіз латентних факторів, що

впливають на енергоефективність) або прикладними (розробка агрегованих характеристик/індексів для прогнозування та управління енергетичним комплексом регіону).

2. Вибір сукупності ознак та об'єктів: визначення переліку первинних, вимірюваних індикаторів (змінних  $X_i$ ) та об'єктів аналізу (наприклад, регіонів України).

3. Отримання вихідної структури: збір даних та побудова кореляційної матриці між початковими індикаторами.

4. Коригування індикаторної структури: перегляд та, за необхідності, оптимізація початкового набору індикаторів відповідно до цілей аналізу та статистичних вимог моделі.

5. Виявлення латентних факторів: виокремлення загальних факторів (другого порядку) за допомогою математичних методів (наприклад, метод головних компонент або метод максимальної правдоподібності).

6. Інтерпретація та використання: змістовне осмислення виявлених латентних факторів (надання їм назв, що відповідають економічному чи технічному сенсу) та застосування результатів (наприклад, для розрахунку інтегрального показника енергоефективності).

Реалізація цих етапів дозволяє перейти від складної мережі взаємозв'язків між первинними показниками до простішої, причинно-наслідкової моделі на більш високому, концептуальному рівні, що є надзвичайно цінним як для теоретичних, так і для практичних розробок у сфері енергоменеджменту.

Модель ФАІ дозволяє кількісно визначити, наскільки спостережувані змінні  $X_i$  піддаються впливу спільних, першопричинних факторів  $F_j$ , виражаючи це через коефіцієнти факторних навантажень або відсотки поясненої дисперсії.

*Математична формалізація та методологія факторного аналізу*

## 1. Традиційна лінійна модель

Традиційна модель факторного аналізу базується на представленні матриці спостережень  $X$ , де  $x_{ij}$  — це значення  $i$ -го індикатора енергоефективності для  $j$ -го об'єкта (регіону), у вигляді лінійних комбінацій значень  $m$  загальних факторів  $F_k$  та залишкових компонент  $e_{ij}$  (характерних факторів). Математично це виражається так:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{ik} F_{kj} + e_{ij}, \quad i = 1, \dots, p; \quad j = 1, \dots, n. \quad (1.2)$$

де  $x_{ij}$  — значення  $i$ -го індикатора для  $j$ -го регіону (об'єкта).

$a_{ik}$  — факторне навантаження (вага)  $k$ -го фактора на  $i$ -тий індикатор.

$F_{kj}$  — значення  $k$ -го загального фактора для  $j$ -го регіону.

$e_{ij}$  — неузгодженість (залишкова компонента, або характерний фактор), унікальна для  $i$ -го індикатора та  $j$ -го регіону.

$p$  — кількість індикаторів;  $n$  — кількість об'єктів;  $m$  — кількість загальних факторів ( $m < p$ ).

Основне завдання ФАІ полягає у виявленні загальних факторів  $F_k$  та відповідних факторних навантажень  $a_{ik}$ . Вибір кількості факторів  $m$  виконується за критерієм мінімізації кореляції між векторами неузгодженостей  $e_i$  (характерними факторами).

## 2. Практична модель (нормовані спостереження)

На практиці, для зручності та коректності розрахунків, аналіз часто проводиться на нормованих вихідних даних. Для нормованого спостереження  $z_i$  модель лінійного факторного аналізу спрощується і набуває вигляду:

$$z_i = a_{i1} F_1 + a_{i2} F_2 + \dots + a_{im} F_m + e_i. \quad (1.3)$$

Тут передбачається, що математичні сподівання загальних факторів  $E(F_k)$  та характерних факторів  $E(e_i)$  дорівнюють нулю.

У матричному виразі ця модель записується як:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \mathbf{E}. \quad (1.4)$$

$\mathbf{Z}$  — матриця нормованих спостережень.

$A$  — матриця факторних навантажень ( $p \times m$ ).

$F$  — матриця значень загальних факторів ( $m \times n$ ).

$E$  — матриця характерних факторів ( $p \times n$ ).

Геометрично, сукупність загальних факторів  $F$  формує базис простору, в якому описуються вектори індикаторів  $Z$ .

### 3. Двоетапна процедура факторного аналізу

Процедура обчислення та інтерпретації факторів, як правило, складається з двох основних етапів:

1. Пошук початкового розв'язку (екстракція Факторів): на цьому етапі знаходиться початкове рішення, яке максимально пояснює дисперсію спостережуваних даних, зазвичай, за критерієм, що мінімізує вплив характерних факторів  $E$ .

2. Обертання факторів (ротація): Отримане початкове рішення часто піддається ортогональному або косокутному обертанню (наприклад, *Varimax*, *Quartimax*, *Promax*). Мета обертання — досягти простої структури, тобто такого вигляду матриці навантажень  $A$ , яка дозволяє максимально чітко розділити змінні: кожен індикатор має високе навантаження лише на один фактор і майже нульові навантаження на інші.

### 4. Критерії визначення числа факторів

Для перевірки гіпотези  $H_m$ , яка полягає в тому, що вектор спостережуваних індикаторів  $Z$  може бути адекватно представлений моделлю з фіксованою кількістю загальних факторів  $m$ , використовуються критерії адекватності моделі.

Основні емпіричні критерії для відбору кількості факторів ( $m$ ):

- Критерій Кайзера (Kaiser criterion): До розгляду приймаються лише ті фактори, яким відповідають власні числа (eigenvalues) кореляційної або коваріаційної матриці, більші за 1.
- Критерій "Кам'янистої осипі" (Scree Plot criterion): Фактори відбираються до тієї точки на графіку власних чисел (*Scree Plot*), де

відбувається різке падіння (злам) кривої, а подальші власні числа мало відрізняються одне від одного.

На практиці часто використовують послідовну перевірку гіпотез  $H_m$  проти альтернативи  $H_{m+1}$  (тобто,  $m$  факторів достатньо проти  $m+1$  фактора). Однак варто пам'ятати, що рівні значущості на кожній окремій стадії такої послідовної процедури не дають точної оцінки властивостей усієї процедури в цілому.

### **Висновки до розділу 1**

Проведений аналіз виявив стратегічну важливість паливно-енергетичного комплексу для сталого економічного та соціального розвитку України та її регіонів в умовах високої енергозалежності. Забезпечення енергетичної безпеки визначено як життєво необхідний пріоритет, що ґрунтується на принципах незалежності, стійкості, стабільності, диверсифікації та енергоефективності. Отже, визначено, що:

1. Україна є енергодефіцитною країною (менше 50% потреб покривається власними джерелами) із критично високою енергоємністю ВВП, що в кілька разів перевищує європейські показники. Основні причини: структурні особливості економіки (домінування важкої промисловості), фізичне та моральне зношення основних фондів (від 10% до 80% собівартості продукції припадає на енергоресурси) та технологічна відсталість.

2. Необхідний перехід від екстенсивного шляху (збільшення обсягів виробництва/споживання) до інтенсивного, заснованого на раціональному використанні енергії. Це поняття включає не лише енергозбереження, але й структурну диверсифікацію та інтенсивне введення в обіг нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ).

3. Визначено ключові фактори, що впливають на функціонування РЕК, включаючи надійне енергозабезпечення, стійкість до загроз, ефективність ПЕР-використання, сприятливий клімат та енергетичну незалежність.

4. Існує необхідність переходу від розрізненого аналізу показників до комплексної, інтегральної оцінки енергоефективності на регіональному рівні. Такий підхід дозволяє системно врахувати технічні, економічні та екологічні чинники, обґрунтувати інвестиції та об'єктивно моніторити прогрес у досягненні національних цілей. Забезпечення ЕБ ґрунтується на моніторингу та індикативному аналізі. Домінуюче значення з точки зору стійкості енергопостачання мають загрози економічного та управлінсько-правового характеру.

5. Обґрунтовано систему вимог до індикаторів ЕБ, серед яких ключовими для подальшої роботи є комплексність (отримання одного кінцевого кількісного інтегрального показника), порівнянність та повторюваність оцінок. Для кількісного відображення стану ЕБ застосовується бальна шкала кризовості (3-рівнева або 8-рівнева градація).

Таким чином, у розділі 1 закладено теоретико-методологічну базу для подальшого дослідження: обґрунтовано необхідність інтегрального оцінювання енергоефективності як ключового елемента регіональної енергетичної безпеки та визначено факторний аналіз як основний інструмент для формування цього оцінювання.

## РОЗДІЛ 2.

# ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

### **2.1. Порівняльний аналіз світових та вітчизняних методик оцінювання енергетичної ефективності**

Міжнародна практика моніторингу енергоефективності базується на стандартизованих одиницях вимірювання (показниках, індикаторах та інтегральних індексах), які акумулюються у провідних світових базах даних. Серед найбільш значущих платформ слід виділити ODYSSEE, базу даних Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) та ресурси Енергетичного інформаційного агентства США (U.S. Energy Information Administration). Розглянемо детальніше методологію, закладену в одній із ключових європейських баз.

База даних ODYSSEE, розроблена організацією Enerdata в межах проекту ODYSSEE-MURE, є важливим інструментом для оцінювання енергоефективності. Ця платформа охоплює індикатори кінцевого енергоспоживання, а також їхні ключові рушійні фактори (індекси). Вона активно використовується для аналізу енергетичної ефективності в усіх країнах Європейського Союзу, а також у Швейцарії та Сербії.

Індикатори в системі ODYSSEE класифікуються як макрорівневі, що відображають загальний стан економіки, і секторальні, які охоплюють ключові галузі кінцевого споживання: промисловість, транспорт, житловий сектор, сектор послуг, сільське господарство тощо. Ці показники слугують двом основним цілям: відстеження динаміки змін енергоефективності та кількісне вимірювання досягнутої економії енергії.

Загалом, платформа оперує понад 200 індикаторами на рівні країни, які згруповані за трьома основними типами одиниць вимірювання:

1. Питоме (одиничне) або кінцеве споживання енергії: Це найпоширеніша група індикаторів, що встановлює відношення енергоспоживання до відповідного показника економічної активності, виміряного у фізичних величинах (наприклад, тоннах продукції або квадратних метрах площі). Вони відомі як питомі індикатори. Сюди також відносять показники, виражені через викиди CO<sub>2</sub>.

- *Приклади:* витрата палива на 100 км пробігу (л/100 км), річне споживання електроенергії побутовим приладом (кВт·год/рік).

2. Показники ринкового проникнення: Відображають рівень поширення енергозберігаючих технологій чи практик.

- *Приклади:* частка пасажирообігу, забезпеченого громадським транспортом; частка використання LED-ламп у загальному освітленні.

3. Енергоемність на агрегованому рівні: Ці показники пов'язують обсяги енергоспоживання з показниками діяльності, вимірними у грошовому еквіваленті (як-от ВВП, додана вартість).

- *Приклади:* енергоспоживання на одиницю ВВП (кВт·год/€, т.у.п./€ за рік).

Для узагальненого відображення динаміки енергоефективності використовується інтегральний індекс ODEX (ODYSSEE-Index). Він дозволяє оцінити зміни ефективності як в окремих секторах (транспорт, житло, промисловість), так і в економіці в цілому (сукупність кінцевих споживачів).

Принцип розрахунку ODEX полягає в агрегуванні змін ефективності на рівні підсекторів. Сектор  $k$  поділяється на підсектори  $i$ , для кожного з яких обчислюється індикатор споживання  $I_{k,i}^t$ . Найбільш застосовними для розрахунку індексу ODEX є індикатори першого типу (питоме споживання).

Індикатор споживання для  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у році  $t$  розраховується як відношення його кінцевого споживання у поточному році до споживання у попередньому ( $t-1$ ) або базовому році:

$$I_{k,i}^t = \frac{C_{k,i}^t}{C_{k,i}^{t-1} \text{ або } C_{k,i}^{\text{баз}}} \quad (2.1)$$

де:

$C_{k,i}^t$  — індикатор споживання  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у році  $t$ , в.о.;

$C_{k,i}^t$  — кінцеве споживання  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у році  $t$  (кВт, л/км, Дж, тощо);

$C_{k,i}^{t-1}$  або  $C_{k,i}^{баз}$  — кінцеве споживання  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у попередньому або базовому році.

Далі, індекс енергоефективності ODEX для всього сектора  $k$  або економіки в цілому обчислюється як зважена сума індикаторів підсекторів, де вагові коефіцієнти  $\omega_{k,i}^t$  визначаються часткою споживання  $i$ -го підсектору в загальному споживанні сектора  $k$  у році  $t$ :

$$ODEX_k^t = \sum_i I_{k,i}^t \cdot \omega_{k,i}^t \quad (2.2)$$

де:

$ODEX_k^t$  — індекс енергоефективності  $k$ -го сектора або всієї економіки, в.о.;

$\omega_{k,i}^t$  — ваговий коефіцієнт (частка споживання  $i$ -го підсектору в секторі  $k$  у році  $t$ , наприклад, 40% = 0.4), в.о.

Рівень підвищення енергоефективності, згідно з цією методологією, відображається як (100 - ODEX) відсотків. Наприклад, значення ODEX=90 свідчить про підвищення енергоефективності на 10% (100-90=10 %).

Показники другого типу (ринкового проникнення) часто використовуються для оцінювання обсягів досягнутого енергозбереження, яке розраховується як різниця між фактичним та модельним споживанням енергії.

Окрім розрахунку індексу ефективності ODEX, методологія ODYSSEE також передбачає оцінку обсягів енергозбереження (ES). Це досягається шляхом використання індикаторів другого типу (показників ринкового проникнення).

Енергозбереження в  $i$ -му підсекторі  $k$  розраховується як добуток різниці питомого споживання між базовим та поточним роком на показник розповсюдження енергоефективних технологій ( $L$ ):

$$ES = (C_{k,i}^{\text{баз}} - C_{k,i}^t) \cdot L \quad (2.3)$$

де:

$ES$  — обсяг енергозбереження, що досягнутий, вимірюється у фізичних одиницях (кВт, л/км, Дж, тощо);

$C_{k,i}^{\text{баз}}$  — питома споживання  $i$ -го підсектору  $k$  у вибраному (базовому) році, кВт, л/км, Дж, тощо;

$C_{k,i}^t$  — питома споживання  $i$ -го підсектору  $k$  у поточному році  $t$ ;

$L$  — показник розповсюдження (наприклад, кількість одиниць обладнання чи площа), в.о.

Приклад застосування: Якщо питома споживання холодильників зменшилося з 400 кВт·год/рік до 300 кВт·год/рік (різниця становить 100 кВт·год/рік) у країні з парком у 1 мільйон одиниць ( $L=10^6$ ), загальний обсяг економії складе:  $ES = (400 - 300) \cdot 10^6 = 100 \cdot 10^6$  кВт·год, або 100 ГВт·год.

У випадках, коли достовірні дані про показники розповсюдження ( $L$ ) відсутні або їх важко зібрати, обсяги енергозбереження для сектора  $k$  можуть бути оцінені за допомогою індексу ефективності  $ODEX_k^t$ :

$$ES_k = C_k^t \cdot \left(1 - \frac{1}{ODEX_k^t}\right) \quad (2.4)$$

де:

$ES_k$  — сумарний обсяг енергозбереження сектора  $k$ ;

$C_k^t$  — фактичне споживання енергії сектора  $k$  у році  $t$ ;

$ODEX_k^t$  — індекс енергоефективності сектора  $k$  у році  $t$ .

Обсяг енергозбереження  $ES$  для  $i$ -го підсектору сектора  $k$  розраховується як добуток різниці питомого споживання між базовим ( $t_{base}$ ) та поточним ( $t$ ) роками на показник розповсюдження енергозберігаючих заходів  $L$ :

$$ES = (UC_{i,t_{base}}^k - UC_{i,t}^k) \cdot L \quad (2.5)$$

де:

$ES$  — обсяг енергозбереження, вимірюється у фізичних одиницях (кВт, л/км, Дж тощо);

$UC_{i,t}^k$  — питома споживання  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у поточному році  $t$ ;

$UC_{i,t_{base}}^k$  — питома споживання  $i$ -го підсектору сектора  $k$  у вибраному (базовому) році;

$L$  — показник розповсюдження на ринку енергозберігаючих технологій або практик (наприклад, кількість одиниць обладнання).

У випадках, коли показники розповсюдження ( $L$ ) є складними для визначення або збору, обсяги енергозбереження для всього сектора  $k$  ( $ES^k$ ) можуть бути оцінені опосередковано — через загальний індекс енергоефективності  $ODEX_t^k$  та фактичне споживання енергії:

$$ES^k = UC_t^k \cdot \left( \frac{100}{ODEX_t^k} - 1 \right) \quad (2.6)$$

де:

$ES^k$  — обсяг енергозбереження сектора  $k$ ;

$UC_t^k$  — споживання енергії сектора  $k$  у році  $t$ ;

$ODEX_t^k$  — індекс енергоефективності сектора  $k$  у році  $t$ , в.о.

Показники третього типу (енергоємність, наприклад, кВт·год/€) застосовуються для відповіді на фундаментальне питання: «Який обсяг

енергії необхідний для генерування однієї одиниці економічного результату (ВВП або доданої вартості)?»

Для забезпечення справедливого та коректного міжкраїнового порівняння енергоємності, необхідно коригувати економічні показники з урахуванням паритету купівельної спроможності (ПКС). Цей крок є критичним, оскільки номінальна різниця у ВВП між країнами часто відображає відмінності в загальному рівні цін, а не лише в обсязі економічної діяльності.

Приклад важливості ПКС: Якщо номінальний ВВП на душу населення Німеччини у 2015 році був у 3 рази вищим, ніж у Португалії, більша частина цієї різниці пояснюється вищим рівнем цін у Німеччині. При перерахунку ВВП на основі ПКС, різниця між цими країнами скорочується приблизно до 1.7 разу [21]. Врахування ПКС дозволяє уникнути переоцінки або недооцінки енергоємності економіки.

Крім економічних поправок, при розрахунку секторальних показників споживання, зокрема у житловому та послуг, обов'язковим є застосування кліматичних поправок.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА), засноване після нафтової кризи 1973 року, є ключовою глобальною платформою для збору та аналізу енергетичної інформації. На початковому етапі членами-засновниками МЕА були 17 держав [22]. Станом на 2022 рік, МЕА об'єднує дані від 31 країни-члена (включаючи США, Японію, Німеччину, Канаду та ін.) та 11 країн-асоційованих партнерів. Серед країн-партнерів важливе місце посідає Україна (поряд з Китаєм, Індією, Бразилією та ПАР), що свідчить про глобальне визнання та поширення політики МЕА.

Схожим із системою ODYSSEE чином, МЕА проводить моніторинг глобальних економічних трендів та оцінює кінцеве енергоспоживання з розбивкою за ключовими секторами (промисловість, транспорт, житловий сектор, сектор послуг та сільського господарства). Незважаючи на подібну секторальну структуру, методика розрахунку індексу енергоефективності в

МЕА відрізняється. Агентство використовує метод трифакторної декомпозиції на основі Log Mean Divisia Index I (LMDI I), який є одним з найпоширеніших інструментів для кількісної оцінки впливу різних факторів (ефективність, структура, активність) на загальне енергоспоживання.

Розрахунок індексу енергоефективності, що застосовується Міжнародним енергетичним агентством (МЕА), ґрунтується на методі трифакторної декомпозиції Log Mean Divisia Index I (LMDI I). Цей метод дозволяє розкласти загальну зміну споживання енергії на окремі впливові складові (ефекти) порівняно з базовим роком.

Загальна зміна у споживанні енергії  $\Delta C$  між роком  $t$  та базовим роком  $0$  визначається наступним чином:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_{\text{активність}} + \Delta C_{\text{структура}} + \Delta C_{\text{енергоємність}} \quad (2.7)$$

Де:

$C^t$  — загальне кінцеве споживання енергії для всіх секторів у році  $t$ ;

$C^0$  — загальне кінцеве споживання енергії у базовому році;

$\Delta C_{\text{активність}}$ ,  $\Delta C_{\text{структура}}$ ,  $\Delta C_{\text{енергоємність}}$  — відповідно, ефекти зміни активності, структурних змін та зміни енергоємності, що спричинили різницю  $\Delta C$  порівняно з базовим роком.

Вплив кожного фактора розраховується як:

$$\Delta C_{\text{активність}} = \sum_i \omega_i \cdot \ln \left( \frac{A^t}{A^0} \right) \quad (2.8)$$

$$\Delta C_{\text{структура}} = \sum_i \omega_i \cdot \ln \left( \frac{S_i^t}{S_i^0} \right) \quad (2.9)$$

$$\Delta C_{\text{енергоємність}} = \sum_i \omega_i \cdot \ln \left( \frac{E_i^t}{E_i^0} \right) \quad (2.10)$$

де:

$C_i^t, C_i^0$  — енергоспоживання  $i$ -го підсектору у році  $t$  та базовому році, відповідно;

$A^t, A^0$  — загальний рівень активності (наприклад, ВВП, обсяг перевезень) у році  $t$  та базовому році;

$S_i^t = A_i^t / A^t$  — частка активності  $i$ -го сектору у загальній активності (структурний ефект);

$E_i^t = C_i^t / A_i^t$  — енергоємність  $i$ -го сектору;

$\omega_i = \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln(C_i^t) - \ln(C_i^0)}$  — ваговий коефіцієнт, де  $a, b > 0$  та  $\ln$  — натуральний логарифм.

На разі база даних МЕА розширила свій інструментарій, включивши фіксоване адитивне чотирифакторне розкладання для аналізу динаміки викидів  $CO_2$ , де базовим роком обрано 2000-й рік. Ця методика додає четвертий ефект – карбоноємність (або вуглецеву інтенсивність енергії).

Загальна зміна викидів  $\Delta CO_2$  між роком  $t$  та базовим роком 0 розкладається на чотири складові:

$$\Delta CO_2 = CO_2^t - CO_2^0 = \Delta CO_{2,\text{активність}} + \Delta CO_{2,\text{структура}} + \Delta CO_{2,\text{енергоємність}} + \Delta CO_{2,i} \quad (2.11)$$

де:

$CO_2^t, CO_2^0$  — сумарне значення викидів для всіх секторів у році  $t$  та базовому році;

$\Delta CO_{2,\text{активність}}, \Delta CO_{2,\text{структура}}, \Delta CO_{2,\text{енергоємність}}, \Delta CO_{2,\text{карбоноємність}}$  — відповідно, ефекти активності, структури, енергоємності та карбоноємності (вуглецевої інтенсивності), що вплинули на різницю  $\Delta CO_2$ .

Вплив окремих факторів розраховується за аналогічними формулами (2.12–2.15), використовуючи відповідні показники:

$$\Delta CO_{2,\text{активність}} = \sum_i \omega_i' \cdot \ln \left( \frac{A^t}{A^0} \right) \quad (2.12)$$

$$\Delta CO_{2,\text{структура}} = \sum_i \omega'_i \cdot \ln \left( \frac{S_i^t}{S_i^0} \right) \quad (2.13)$$

$$\Delta CO_{2,\text{енергоємність}} = \sum_i \omega'_i \cdot \ln \left( \frac{E_i^t}{E_i^0} \right) \quad (2.14)$$

$$\Delta CO_{2,\text{карбоноємність}} = \sum_i \omega'_i \cdot \ln \left( \frac{Z_i^t}{Z_i^0} \right) \quad (2.15)$$

де:

$Z_i^t$  — карбоноємність  $i$ -го сектору (відношення викидів  $CO_2$  до спожитої енергії  $C_i^t$ );

$\omega'_i = \frac{CO_{2,i}^t - CO_{2,i}^0}{\ln(CO_{2,i}^t) - \ln(CO_{2,i}^0)}$  — ваговий коефіцієнт для викидів.

Для забезпечення точності та порівнянності даних, особливо в секторах, чутливих до температури (житловий, сфера послуг), MEA та ODYSSEE використовують кліматичні поправки. Кінцеве споживання коригується на основі коефіцієнта градусо-доби (Heating Degree Days, HDD).

Градусо-доба (HDD) — це інтегральний показник, що вимірює, наскільки зовнішня температура протягом певного періоду відхилялася від комфортної (базової) температури, вимагаючи додаткового опалення.

Коефіцієнт градусо-доби (HDD) розраховується за формулою:

$$HDD = \sum_{k=1}^n \max(T_{\text{баз}} - T_k, 0) \quad (2.16)$$

де:

$T_{\text{баз}}$  — значення температури (базове - комфортна температура зовнішнього повітря, °C);

$T_k$  — середнє значення температури впродовж дня, °C;

$n$  — загальна кількість днів у заданому періоді.

Значення споживаної енергії, з врахуванням кліматичних температурних показників ( $C_{\text{скор.}}^i$ ), розраховується шляхом масштабування фактичного споживання на відношення середнього багаторічного значення HDD до HDD у звітному році:

$$C_{\text{скор.}}^i = C_{\text{факт.}}^i \cdot \frac{\overline{HDD}}{HDD^i} \quad (2.17)$$

де:

$C_{\text{скор.}}^i$  — скориговане значення споживання енергії для  $i$ -го року;

$C_{\text{факт.}}^i$  — реальне значення споживання енергії для  $i$ -го року;

$\overline{HDD}$  — середнє багаторічне значення градусо-дїб (наприклад, за період понад 25 років);

$HDD^i$  — фактична кількість градусо-дїб для  $i$ -го року.

Світові підходи до оцінювання енергоефективності, що впроваджуються базами даних MEA та ODYSSEE, а також Енергетичним інформаційним агентством США, знайшли своє відображення у міжнародних нормативних документах. Ці методичні засади інтегровані в міжнародний стандарт ISO 17742:2015, IDT, який в Україні адаптовано як ДСТУ ISO 17742. Стандарт передбачає два основні підходи до розрахунку енергоефективності:

1. Грунтуючись на показниках (Energy Performance Indicators): використання питомих показників (наприклад, споживання газу на одне домогосподарство).

2. На основі заходів (Measured Energy Savings): оцінка економії від конкретних енергоефективних заходів (наприклад, кількість впроваджених LED-ламп у регіоні).

В Україні за формування та реалізацію державної політики у сфері енергоефективності відповідає Держенергоефективність, статистичні дані на національному рівні надає Укрстат. Після 2014 року Україна значно активізувала свою інтеграцію в європейський енергетичний простір, зокрема,

доєднавшись до МЕА як країна-партнер в рамках програми EU4Energy. Це сприяло перейняттю та впровадженню описаних вище міжнародних методик оцінювання енергоефективності на національному та регіональному рівнях.

## **2.2. Методи аналізу складних багатофакторних систем для інтегральної оцінки**

Оцінювання енергоефективності регіонів є типовою складною багатофакторною задачею, оскільки вимагає одночасного опрацювання великої кількості показників (індикаторів) різної природи та розмірності ( $n > 3$ ). У випадку наявності значної кількості індикаторів виникає потреба в узагальненні та виявленні латентних зв'язків між регіонами.

Для ефективного вирішення таких задач із високорозмірними даними доцільно застосовувати алгоритми машинного навчання (Machine Learning) та багатовимірної статистики. Ключовими інструментами є:

- Кластеризація (Clustering): Дозволяє об'єднати регіони в групи (кластери) на основі схожості їхніх показників енергоефективності, що є основою для типізації.
- Дискримінантний аналіз (Discriminant Analysis): Використовується для виявлення найбільш значущих індикаторів, які найбільше впливають на розподіл регіонів за кластерами.
- Метод головних компонент (Principal Component Analysis, PCA): Застосовується для зниження розмірності вихідних даних (якщо  $n$  дуже велике) без значної втрати інформації, що підвищує якість подальшої кластеризації.

### *Кластеризація методом $k$ -середніх ( $k$ -means)*

Кластеризація  $k$ -середніх є найпоширенішим ітеративним алгоритмом, який призначений для розбиття об'єктів (у нашому випадку, регіонів) на  $k$  заздалегідь визначених кластерів.

Для роботи з даними багатовимірної матриці  $X$  розмірністю  $m \times n$ , де  $m$  — загальна кількість регіонів (об'єктів),  $n$  — кількість індикаторів, за якими

виконують дослідження, першочерговим кроком є уніфікація величин різної розмірності. Це досягається шляхом нормалізації або стандартизації вихідних даних.

$X = (x_{m,n})$ , де  $x_{m,n}$  — зведене значення  $n$ -го індикатора.

### 1. Уніфікація даних

а) Нормалізація Min-Max (масштабування до діапазону [0; 1]):

$$\tilde{x}_{m,n} = \frac{x_{m,n} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.18)$$

б) Альтернативна нормалізація:

$$\tilde{x}_{m,n} = \frac{x_{m,n}}{x_{max}} \quad (2.19)$$

де:

$\tilde{x}_{m,n}$  — нормалізоване значення;  $x_{m,n}$  — вихідне значення;  $x_{max}, x_{min}$  — максимальне та найменше значення  $n$ -го показника.

в) Стандартизація Z-оцінкою (Z-score) (масштабування до нульового середнього та одиничної дисперсії):

$$\tilde{x}_{m,n} = \frac{x_{m,n} - \bar{x}}{\sigma} \quad (2.20)$$

де:

$\bar{x}$  — попередньо визначене середнє значення  $n$ -го показника;

$\sigma$  — значення стандартного відхилення  $n$ -го показника.

### 2. Визначення оптимальної кількості кластерів ( $k$ )

Ключовим моментом є вибір оптимального значення  $k$ . Найчастіше використовується Правило ліктя (Elbow Method). Цей метод базується на аналізі залежності суми квадратів відстаней всередині кластерів від загальної кількості кластерів ( $k$ ).

WCSS також називається «викривленням» або «спотворенням» (Distortion) і обчислюється як:

$$WCSS = \sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \|x - \mu_k\|^2 \quad (2.21)$$

де:

$C_k$  — множина регіонів, віднесених до кластера  $k$ ;

$x$  — вектор значень точки (регіону) всередині кластера  $C_k$ ;

$\mu_k$  — вектор значень центроїда кластера  $k$ .

Оптимальне  $k$  обирається в точці, де крива WCSS різко сповільнює своє падіння, формуючи візуальний "лікоть".

### 3. Алгоритм $k$ -середніх

Нехай  $K$  — заздалегідь визначена кількість кластерів. Процедура ітеративної кластеризації включає наступні кроки:

1. Ініціалізація центроїдів. Випадковим чином обираються  $K$  початкових точок, які стають центроїдами  $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K)$

2. Присвоєння точок. Кожен регіон  $m$  відноситься до того кластера  $k$ , центроїд якого є найближчим до даного регіону за обраною метрикою відстані.

3. Оновлення центроїдів. Центроїди кожного кластера  $\mu_k$  перераховуються як середнє арифметичне всіх точок (регіонів), що входять до даного кластера:

$$\mu_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x \in C_k} x \quad (2.22)$$

4. Повторення. Кроки 2 і 3 до отримання необхідного результату.

#### 4. Вимірювання відстаней (метрики)

Для визначення "найближчого" центроїда використовуються різні метрики відстані:

- Евклідова відстань (Euclidean Distance): Найпоширеніша метрика, що відповідає геометричній відстані в  $n$ -вимірному просторі.

$$d_{\text{Евклідова}}(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_i)^2} \quad (2.23)$$

- Манхеттенська відстань (Manhattan Distance): Вимірює відстань як суму абсолютних різниць координат (шлях, як у кварталах міста).

$$d_{\text{Манхеттенська}}(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^n |x_i - c_i| \quad (2.24)$$

- Відстань Чебишева (Chebyshev Distance): Визначається як максимальна різниця координат.

$$d_{\text{Чебишева}}(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \max_i (|x_i - c_i|) \quad (2.25)$$

Де:

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  — вектор значень  $n$  індикаторів для регіону  $m$ ;

$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)$  — вектор координат центроїда  $k$ -го кластера.

Окрім Евклідової та Манхеттенської відстаней, для розрахунку близькості між регіонами та центроїдами кластерів можуть застосовуватися інші метрики.

#### *Косинусна відстань (Cosine Distance)*

Косинусна подібність використовується як ключова метрика для оцінки семантичної близькості або тематичної спорідненості об'єктів (наприклад, документів чи слів). Її механізм базується на обчисленні косинуса кута між відповідними векторами, що дозволяє ігнорувати різницю в їхній довжині і зосередитися виключно на орієнтації в просторі ознак. Вона особливо корисна, коли важливо оцінити пропорційну схожість профілів енергоспоживання, а не абсолютні величини. Косинусна схожість ( $S_{cos}$ ) обчислюється як:

$$S_{cos}(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{c}}{\|\mathbf{x}\| \cdot \|\mathbf{c}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i c_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2}} \quad (2.26)$$

Тоді косинусна відстань розраховується як:

$$d_{cos} = 1 - S_{cos}$$

де:

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  — вектор значень індикаторів  $m$ -го регіону;

$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)$  — вектор координат центроїда  $k$ -го кластера;

$\mathbf{x} \cdot \mathbf{c}$  — скалярний добуток векторів.

Переваги та обмеження методу  $k$ -середніх подано у вигляді табл.2.1.

Таблиця 2.1. - Переваги та обмеження методу  $k$ -середніх

Аспект	Опис
Переваги	Простота та ефективність. Алгоритм легко реалізується та інтерпретується. Масштабованість. Добре працює з великими обсягами даних.
Недоліки	Необхідність попереднього задання $K$ . Потребує визначення оптимальної кількості кластерів. Чутливість до ініціалізації. Результат може залежати від початкового вибору центроїдів. Локальні оптимуми. Схильність до збіжності до локальних, а не глобальних оптимумів.

На відміну від методу  $k$ -середніх, агломеративна ієрархічна кластеризація не вимагає попереднього задання кількості кластерів. Цей метод будує ієрархічну структуру (дендрограму), послідовно об'єднуючи найближчі об'єкти (регіони).

Нехай  $X$  — вихідна матриця даних  $m \times n$ . Дані попередньо проходять уніфікацію (нормалізацію за формулами (2.18) або (2.19), або стандартизацію за формулою (2.20)).

Алгоритм ієрархічної кластеризації (знизу-вгору):

1. Початковий етап. Кожен  $m$ -й регіон розглядається як окремий кластер ( $k=m$ ).

2. Об'єднання. На кожному наступному кроці алгоритм знаходить дві найближчі множини (кластери), вимірюючи відстань між ними за обраною метрикою (формули 2.23-2.26) та критерієм зв'язку (наприклад, відстань між найближчими точками (Single Linkage), найвіддаленішими точками (Complete Linkage) або середніми значеннями (Average Linkage)).

3. Ітерація. Крок 2 повторюється, поки:
- Не буде досягнута задана кількість кластерів ( $k$ );
  - Або відстань між кластерами не перевищить певний пороговий критерій;
  - Або зміна відстані між об'єднуваними кластерами на поточному кроці стане незначною.

Переваги та обмеження ієрархічної кластеризації подано у вигляді табл.2.2.

Таблиця 2.2 - Переваги та обмеження ієрархічної кластеризації

Аспект	Опис
Переваги	Гнучкість. Не вимагає завчасного задання кількості кластерів $K$ . Ієрархічна структура. Забезпечує візуалізацію (дендрограма) та можливість аналізу кластерів на різних рівнях деталізації.
Недоліки	Обчислювальна складність. Висока ресурсоемність для великих масивів даних ( $O(m^3)$ або $O(m^2 \log m)$ ). Чутливість до критерію зв'язку. Вибір критерію зв'язку (Single, Complete, Average) може суттєво впливати на форму кластерів. Труднощі з визначенням $K$ . Незважаючи на відсутність необхідності задавати $K$ заздалегідь, вибір оптимального зрізу дендрограми (фінальної кількості кластерів) залишається суб'єктивним.

#### *Кластеризація за щільністю: DBSCAN*

Метод DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) є потужним інструментом для виявлення кластерів довільної форми та відокремлення шуму (викидів) у наборі даних. На відміну від  $k$ -середніх, він базується на концепції щільності точок.

Як і в попередніх методах, вхідна матриця даних  $X$  розмірністю  $m \times n$  (регіони  $x$  індикатори) вимагає уніфікації (нормалізація за формулами (2.18), (2.19) або стандартизація за (2.20)).

Ключові параметри DBSCAN:

- Радіус оточення: максимальна відстань, у межах якої сусідні точки вважаються належними до одного кластера. У кваліфікаційній роботі це

значення може визначатися емпірично або за допомогою методів аналізу найближчих сусідів.

- Мінімальна кількість точок: мінімальна необхідна кількість точок у радіусі, щоб вважати точку ядром кластера.

Алгоритм DBSCAN:

1. Вибір метрики. Обирається відповідна метрика відстані для аналізу (наприклад, Евклідова (2.23), Манхеттенська (2.24) або Косинусна (2.26)).

2. Ідентифікація ядра. Точка  $p$  вважається ядром кластера  $k$ , якщо в межах її радіусу міститься принаймні  $MinPts$  інших точок.

3. Визначення зв'язності кластера. Точка  $q$  досяжна за щільністю від точки  $p$ , якщо між ними існує ланцюг прямої досяжності. Цей ланцюг формується послідовністю об'єктів  $(p_1, p_2, \dots, p_z = q)$ , де кожен елемент  $p_i$  є прямо досяжним за щільністю від  $p_{i-1}$  (тобто  $p_i$  знаходиться в околі  $p_{i-1}$ ), а всі проміжні точки є ядерними точками. Це забезпечує надійну зв'язність між елементами, що належать до одного кластера.

4. Визначення викидів. Усі точки, які є досяжними за щільністю до ядра, об'єднуються у відповідний кластер. Точки, які не є ядрами і не є досяжними з жодного ядра, класифікуються як викиди (шум).

Основні аспекти алгоритму подано у вигляді табл. 2.3.

Таблиця 2.3. - Основні аспекти алгоритму DBSCAN

Аспект	Опис
Переваги	Форма кластерів. Здатність виявляти кластери довільної, не опуклої форми. Гнучкість. Не вимагає попереднього визначення кількості кластерів $K$ . Стійкість до шуму. Ефективно ідентифікує та ігнорує викиди.
Недоліки	Чутливість до параметрів. Результат сильно залежить від коректного вибору $\zeta$ та $MinPts$ . Проблема змінної щільності. Не підходить для наборів даних, де щільність кластерів суттєво різниться. Розмірність. Малоприсадибний для даних дуже великої розмірності (ефект "прокляття розмірності").

### Афінитивна кластеризація (*Affinity Propagation*)

Affinity Propagation (AP) є сучасним методом кластеризації, який базується на концепції обміну "повідомленнями" (афінитивними зв'язками) між усіма точками для вибору найбільш репрезентативних екземплярів (центрів кластерів).

Вхідні дані  $X$  попередньо уніфікуються (нормалізація (2.18), (2.19) або стандартизація (2.20)).

Ключові компоненти AP:

- Матриця схожості  $S$ : Містить оцінку "схожості" між кожною парою точок  $i$  та  $j$ . Зазвичай визначається через негативну квадратичну відстань:

$$S(i, j) = -d^2(i, j) \quad (2.27)$$

де

$d(i, j)$  — значення відстані між точками  $i$  та  $j$  (2.23-2.26).

- Матриця відповідності  $R(r(i, j))$ : Вимірює, наскільки точка  $i$  вважає точку  $j$  хорошим екземпляром для себе. Ініціалізується нулями.
- Матриця доступності  $A(a(i, j))$ : Визначає, наскільки доступно для точки  $j$  бути екземпляром для точки  $i$ , враховуючи інші потенційні екземпляри. Ініціалізується нулями.
- Параметр затухання ( $\lambda$ ): Регулює швидкість оновлення матриць  $R$  та  $A$  між ітераціями. Зазвичай визначається емпірично (наприклад, у даному дослідженні).

Алгоритм Affinity Propagation:

1. Ініціалізація. Обчислюється матриця схожості  $S$ .
2. Алгоритмічна ітерація. На кожному кроці  $t$  алгоритму здійснюється ітеративне та взаємопов'язане оновлення значень матриці відповідності ( $R$ ) та матриці доступності ( $A$ ). Цей процес забезпечує конвергенцію до оптимального набору кластерів і їхніх зразків.
  - Оновлення відповідності  $R$  (Responsibility):

$$r_t(i, j) = (1 - \lambda) \cdot \left( S(i, j) - \max_{j' \neq j} \{a_{t-1}(i, j') + S(i, j')\} \right) + \lambda \cdot r_{t-1}(i, j) \quad (2.28)$$

- Оновлення доступності A (Availability):

$$a_t(i, j) = (1 - \lambda) \cdot \min \left( 0, r_t(j, j) + \sum_{k \neq j} \max(0, r_t(k, j)) \right) + \lambda \cdot a_{t-1}(i, j),$$

для  $i \neq j$

$$a_t(j, j) = (1 - \lambda) \cdot \sum_{k \neq j} \max(0, r_t(k, j)) + \lambda \cdot a_{t-1}(j, j) \quad (2.29)$$

3. Визначення кластерів. Точка  $i$  відноситься до кластера, для якого сума її відповідності та доступності є максимальною.

$$k = \arg \max_j \{r_t(i, j) + a_t(i, j)\} \quad (2.30)$$

Кроки 2 і 3 повторюються до моменту, коли вибрані екземпляри (центри кластерів) перестають змінюватись або зміни стають незначними.

Основні аспекти алгоритму поадно у вигляді табл.2.4.

Таблиця 2.4. - Основні аспекти алгоритму афінитивної кластеризації

Аспект	Опис
Переваги	Фундаментальною перевагою цього алгоритму є його параметрична гнучкість, оскільки він автоматично визначає кількість кластерів без попереднього задання. При цьому, на відміну від інших методів, він ефективно виявляє кластери довільної форми та розмірів, використовуючи глобальний аналіз взаємозв'язків між усіма елементами набору даних.
Недоліки	Обчислювальні ресурси. Вимагає значних обчислювальних ресурсів та пам'яті порівняно з $k$ -середніми ( $O(m^2)$ ). Підбір параметрів. Чутливий до вибору параметра затухання та параметрів схожості.

#### *Аналіз головних компонент (PCA) та подальша кластеризація*

Аналіз головних компонент (Principal Component Analysis, PCA) є ключовим інструментом для зниження розмірності даних (кількості індикаторів  $n$ ) зі збереженням максимальної кількості інформації (дисперсії).

Це особливо важливо для підвищення ефективності та якості подальших методів кластеризації, таких як  $k$ -середні.

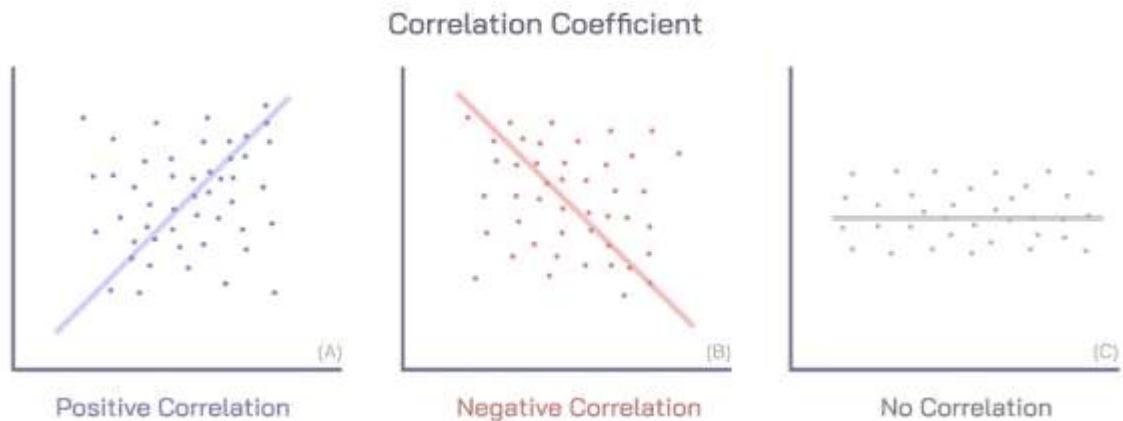


Рисунок 2.1 - Приклади позитивної, негативної та нульової кореляції

Вхідна матриця даних  $X$  розмірністю  $m \times n$  (регіони  $\times$  індикатори) попередньо уніфікується (нормалізація (2.18), (2.19) або стандартизація (2.20)).

Ключова ідея PCA полягає у проектуванні даних на новий простір, де осі (головні компоненти) розташовані в напрямку найбільшої варіативності даних. Кроки PCA:

1. Обчислення коваріаційної матриці ( $\Sigma$ ): Коваріаційна матриця визначає взаємозв'язок між усіма парами індикаторів.

$$\Sigma = \frac{1}{m-1} X^T X \quad (2.30)$$

де  $X$  — значення стандартизованих даних у матричному вигляді, а  $X^T$  — її транспонування.

2. Декомпозиція коваріаційної матриці. Власні вектори ( $V$ ) та відповідні власні значення ( $D$ ) коваріаційної матриці  $\Sigma$  обчислюються шляхом розв'язання відповідної задачі на власні значення. Отримані власні вектори представляють головні компоненти даних, а власні значення кількісно оцінюють частку дисперсії, пояснену кожною компонентою:

$$\Sigma \cdot V = D \cdot V \quad (2.31)$$

Це еквівалентно розв'язанню характеристичного рівняння:

$$\det(\Sigma - D \cdot I) = 0 \quad (2.32)$$

де  $I$  — квадратна матриця із значеннями  $D$  на головній діагоналі та нулями в інших місцях. Власні значення ( $D$ ) відповідають дисперсії даних уздовж кожного власного вектора ( $V$ ) (головної компоненти).

3. Вибір оптимальних компонент: Обираються  $k'$  найбільших власних значень (компонент), які сумарно пояснюють встановлений поріг дисперсії (наприклад, 80-90%). Відповідні їм власні вектори формують матрицю проєкції  $P$  розмірністю  $n \times k'$ .

4. Зниження розмірності: Вихідна матриця даних  $X$  проєктується на матрицю  $P$ , отримуючи нову матрицю  $Z$  зі зниженою розмірністю:

$$Z = X \cdot P$$

5. Кластеризація: До матриці  $Z$  зі зниженою розмірністю застосовується алгоритм  $k$ -середніх для типізації регіонів.

#### *Лінійний дискримінантний аналіз (LDA)*

Лінійний дискримінантний аналіз (Linear Discriminant Analysis, LDA) — це метод, що використовується для класифікації та виявлення найбільш значущих ознак, які найкраще розділяють наперед визначені групи (кластери).

На відміну від PCA, який максимізує загальну дисперсію, LDA фокусується на максимізації роздільності між кластерами.

Вхідна матриця даних  $X$  має бути стандартизована (2.20). Припускається, що регіони вже віднесені до  $K$  кластерів (наприклад, після кластеризації методом  $k$ -середніх). Нехай  $Y$  — вектор, що містить номер кластера ( $k$ ) для кожного регіону  $m$ . Кроки LDA:

1. Обчислення матриці внутрішньокластерного розкиду ( $S_W$ ): Ця матриця відображає варіативність всередині кожного кластера  $k$ .

$$S_W = \sum_{k=1}^K S_k \quad (2.33)$$

де  $S_k$  (матриця розкиду для кластера  $k$ ) розраховується як:

$$S_k = \sum_{x \in C_k} (x - \bar{x}_k)(x - \bar{x}_k)^T \quad (2.34)$$

де  $x$  — індикатор регіону в кластері  $k$ , а  $\bar{x}_k$  — середній вектор індикаторів для кластера  $k$ .

2. Обчислення матриці міжкластерного розкиду ( $S_B$ ): Ця матриця відображає варіативність між середніми значеннями кластерів та загальним середнім.

$$S_B = \sum_{k=1}^K N_k (\bar{x}_k - \bar{x})(\bar{x}_k - \bar{x})^T \quad (2.35)$$

де  $N_k$  — кількість регіонів у кластері  $k$ , а  $\bar{x}$  — загальний середній вектор усіх індикаторів.

3. Визначення оптимальних проєкцій: Оптимальні проєкції (або дискримінантні вектори) у методі лінійного дискримінантного аналізу (LDA) знаходяться шляхом розв'язання узагальненої задачі на власні значення для матриці  $S_W^{-1} S_B$ :

$$S_W^{-1} S_B \cdot W = \Lambda \cdot W \quad (2.36)$$

Оптимальні проєкції ( $W$ ) максимізують відношення міжкластерного розкиду до внутрішньокластерного розкиду ( $S_B / S_W$ ).

4. Вибір дискримінантних функцій: Кількість дискримінантних функцій, що можуть бути отримані, не перевищує  $\min(n, K-1)$ , де  $K$  — кількість кластерів.

Отримані дискримінантні функції LDA можуть бути використані:

- Візуалізації: Проектування регіонів на двовимірний простір, визначений двома головними дискримінантними функціями, дозволяє наочно продемонструвати роздільність між кластерами.
- Виділення ознак: Вагові коефіцієнти дискримінантних функцій вказують на найбільш важливі індикатори енергоефективності, які найбільше сприяють розділенню регіонів на визначені типи.

*Критерій АКАІКЕ (AIC) для вибору оптимальної моделі*

Для аналізу значущості індикаторів і вибору найкращої статистичної моделі (наприклад, для дискримінантного аналізу або регресії) використовується критерій АКАІКЕ (AIC) для вибору оптимальної моделі. AIC є метрикою, що дозволяє порівняти якість кількох статистичних моделей. Його ключове завдання — знайти баланс між точністю моделі (наскільки добре вона відповідає даним) та її складністю (кількістю параметрів). Модель з меншим значенням AIC вважається кращою, оскільки вона забезпечує кращий компроміс між правдоподібністю та простотою.

Критерій АКАІКЕ розраховується за такою формулою:

$$AIC = 2k - 2 \ln(L) \quad (2.37)$$

де  $k$  — значення параметрів. Це штрафний член, який збільшується зі зростанням складності моделі.

$L$  — найбільше значення функції правдоподібності для моделі. Цей член відображає якість підгонки моделі під дані.

У контексті дискримінантного або кластерного аналізу (наприклад, LDA), функція правдоподібності  $L$  відображає ймовірність того, що спостережувані дані були згенеровані при заданих параметрах моделі.

Функція правдоподібності  $L$  для  $K$  кластерів (класів) розраховується як добуток функцій правдоподібності кожного окремого кластера:

$$L = \prod_{k=1}^K L_k \quad (2.38)$$

де  $L_k$  — функція правдоподібності для  $k$ -го кластера. Якщо припустити, що індикатори в кластері  $k$  мають багатовимірний нормальний розподіл,  $L_k$  може бути розрахована так:

$$L_k = \frac{N_k}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \exp \left( -\frac{1}{2} \sum_{i \in C_k} (x_i - \bar{x}_k)^T \Sigma_k^{-1} (x_i - \bar{x}_k) \right) \quad (2.39)$$

де:

$N_k$  — загальна кількість об'єктів у визначеному кластері  $k$ ;

$n$  — загальна кількість параметрів;

$|\Sigma_k|$  — визначник коваріаційної матриці  $\Sigma_k$  для кластера  $k$ ;

$x_i$  —  $i$ -й об'єкт у кластері  $k$ ;

$\bar{x}_k$  — вектор середніх показників у розглянутому кластері  $k$ ;

$\Sigma_k$  — коваріаційна матриця для кластера  $k$ .

Застосування критерію АІС у дослідженні дозволить:

1. Обґрунтувати вибір фінальної моделі (наприклад, оптимальної комбінації індикаторів для LDA).

2. Уникнути перенавчання (overfitting) моделі, забезпечуючи, що модель не є надмірно складною для даних, які ти аналізуєш.

## Висновки до розділу 2

1. Світові бази даних з енергоефективності, зокрема ODYSSEE та Міжнародне енергетичне агентство (МЕА), а також наведені стандарти, як-от ДСТУ ISO 17742, відображають секторальний підхід до оцінювання енергоефективності на національному рівні.

2. Для забезпечення коректного порівняння рівнів енергоефективності та обсягів досягнутого енергозбереження між різними країнами та в динаміці часу застосовуються стандартизовані міжнародні методики. Це включає детальну дезагрегацію (поділ) енергетичних секторів на підсектори та розрахунок ключових індикаторів (наприклад, питомого споживання, ринкового проникнення, енергоємності). Як інструментарій використовуються інтегральні індекси (зокрема, індекс (ODEX) та методи статистичного коригування. Серед останніх є кліматичні поправки (на основі градусо-днів опалення — HDD та коригування економічних показників за паритетом купівельної спроможності (ПКС).

3. Класифікація регіональних енергетичних комплексів обраними методами дозволить об'єднати регіони у гомогенні групи (кластери) на основі профілів їхньої енергоефективності, що є критично важливим для диференційованого підходу до реалізації енергоефективних заходів. Метод

головних компонент забезпечить підвищення якості кластеризації за рахунок зниження розмірності вихідних даних. Дискримінантний аналіз, що використовує критерій АКАІКЕ (AIC) для обґрунтування моделі, допоможе виявити релевантні індикатори, які найкраще розділяють сформовані кластери, та визначити основні фактори, що обумовлюють рівень енергоефективності у заданих секторах.

Таким чином, комбінація міжнародних індикаторів з потужними інструментами багатофакторного аналізу дозволяє перейти від простого моніторингу до глибокої типізації регіонів. Це є необхідною умовою для формування регіональної політики енергоефективності, оскільки дозволяє визначити регіони-лідери для бенчмаркінгу та регіони-аутсайтери, які потребують першочергових цільових інвестицій та заходів.

## РОЗДІЛ 3.

### КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ: БЕНЧМАРКІНГ ТА ФОРМУВАННЯ РЕЙТИНГУ

#### 3.1. Бенчмаркінг та формування рейтингу енергоефективності регіонів України

Оцінка енергоефективності є багаторівневою та може проводитися на рівні країни, області/регіону, а також на рівні кінцевого споживача (підприємства, домогосподарства). Для всебічного аналізу доцільно застосовувати секторальний підхід, що охоплює основні галузі споживання (промисловість, транспорт, житловий сектор тощо).

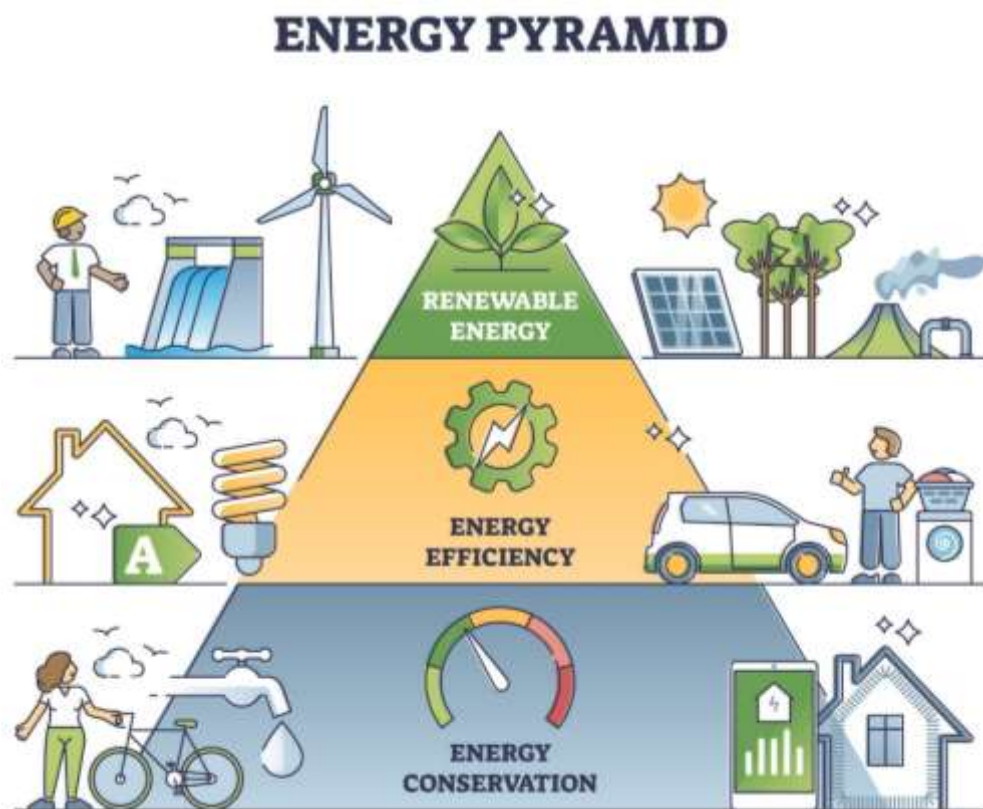


Рисунок 3.1 - Піраміда ієрархії пріоритетів сталої енергетики

Бенчмаркінг (Benchmark-marking) регіонів є критично важливим для визначення орієнтирів покращення на вищому рівні. Аналіз стану енергоефективності на регіональному рівні дає змогу виявити слабкі місця,

які впливають на загальнонаціональні показники.

Задача бенчмаркінгу в контексті регіональних енергетичних комплексів розподіляється на три ключові етапи:

- 1) визначення еталонного (ідеального) значення;
- 2) порівняння фактичних показників з еталонним значенням;
- 3) формування управлінських рішень щодо пріоритетних напрямків покращення.

Процес оцінки енергоефективності регіонів охоплює скінченну множину індикаторів, які відрізняються за природою та одиницями вимірювання. Головна особливість цієї задачі полягає у виявленні регіонів-аутсайдерів, чиї показники найбільше знижують загальну енергоефективність країни. Це зумовлює необхідність розробки якісної та об'єктивної методики рейтингування.

Нехай досліджувана система містить множину  $O$  регіонів  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ . Кожен регіон  $O_m$  характеризується скінченною множиною індикаторів  $X_m = \{x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,n}\}$ .

#### 1. Оцінювання окремого індикатора

Для оцінювання регіону  $O_m$  за окремим індикатором  $n$  спочатку визначається його найкраще (ідеальне) значення ( $x_{ideal}$ ).

Важливо врахувати, що для різних індикаторів ідеальне значення може бути як максимальним (наприклад, частка використання відновлюваних джерел енергії), так і мінімальним (наприклад, обсяг викидів забруднюючих речовин).

Для уніфікації оцінювання  $n$ -го індикатора  $m$ -ї області незалежно від його орієнтації ("чим більше, тим краще" або "чим менше, тим краще") пропонується використовувати наступний уніфікований вираз:

$$E_{m,n} = \frac{x_{факт}}{x_{ідеал}} \quad (3.1)$$

де:

$E_{m,n}$  — оцінка  $n$ -го індикатора  $m$ -ї області (в.о.);

$x_{\text{факт}}$  — нормалізоване фактичне значення індикатора;

$x_{\text{ідеал}}$  — нормалізоване ідеальне значення індикатора.

Примітка: У випадках, коли бажане значення менше за  $x_{\text{ідеал}}$ , для забезпечення адекватності виразу (3.1) необхідно застосувати зворотню нормалізацію або перетворення вихідних даних. Проте, у даному випадку, для спрощення унікалізованого виразу приймається його узагальнена форма, де дані вже уніфіковані для прямого порівняння.

## 2. Якісна характеристика (s-шкала)

Співвідношення  $E_{m,n}$  (3.1) дозволяє присвоїти якісну оцінку відповідно до s-шкали градацій (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Градації оцінювання s-шкали для якісної класифікації індикаторів енергоефективності

№	Характеристика s-го рівня	Кількісний діапазон $E_{m,n}$
1	Дуже високий (ДВ)	$E_{m,n} > 1.0$
2	Високий (В)	$0.7 \leq E_{m,n} \leq 1.0$
3	Середній (С)	$0.3 \leq E_{m,n} < 0.7$
4	Низький (Н)	$0.1 \leq E_{m,n} < 0.3$
5	Дуже низький (ДН)	$E_{m,n} < 0.1$

Примітка: припускається, що всі співвідношення  $E_{m,n}$  менше 0.1 відносяться до 1-го рівня, а усі, що більші за 1, — до 5-го рівня.

## 3. Формування загального рейтингу (відстань до ідеалу)

Для створення загального рейтингу енергоефективності регіонів, що враховує всю множину індикаторів, використовується метод показника відстані до ідеалу (Distance to Ideal). Це дозволяє агрегувати оцінки за всіма індикаторами в один інтегральний показник  $\rho_m$ .

$$\rho_m = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_{\text{ідеал}} - x_{\text{факт}})^2} \quad (3.2)$$

де  $\rho_m$  — відстань до ідеалу для  $m$ -го об'єкту дослідження (відн.од.);

$x_{\text{факт}}$  — нормалізована величина значення  $n$ -го індикатора  $m$ -го об'єкту дослідження;

$x_{\text{ідеал}}$  — еталонне (максимально можливе) нормалізоване значення  $n$ -го показника.

Найкращий регіон матиме мінімальне значення  $\rho_m$ .

#### *Етапи розв'язання задачі рейтингування*

Для забезпечення структурованості, процес формування рейтингу енергоефективності регіонів охоплює наступні етапи:

1. Формування вихідної матриці індикаторів ( $X$ ) (3.3). Стовпці матриці відповідають індикаторам ( $n$ ), а рядки — регіонам України ( $m$ ). Визначається вектор ідеальних значень  $X_{\text{ідеал}}$ .

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

де  $x_{m,n}$  — вихідне значення  $n$ -го індикатора  $m$ -го об'єкту дослідження.

2. Уніфікація індикаторів шляхом нормалізації (2.18-2.19) або стандартизації (2.20).

3. Кількісно-якісна оцінка. Формування оцінки  $E_{m,n}$  за формулою (3.1) та присвоєння якісного рівня за  $s$ -шкалою (табл. 3.1).

4. Обчислення метрик близькості ( $\rho_m$ ) за формулою (3.2).

5. Створення рейтингу. Ранжування регіонів за зростанням показника  $\rho_m$

6. Формування обґрунтованих управлінських рішень.. Визначення пріоритетних напрямків розвитку та інвестицій на основі позиції регіону в рейтингу та його слабких  $s$ -оцінок.

Дана методика є гнучкою і може застосовуватись як для міжрегіонального порівняння, так і всередині окремих кластерних груп регіонів (типізація).

### 3.2. Розробка системи індикаторів та порогових значень для оцінки енергетичної ефективності регіону

Формування адекватної системи оцінки енергетичної безпеки регіональних енергетичних комплексів вимагає визначення чіткого набору індикаторів, здатних відобразити ключові виклики та можливості. У Таблиці 3.2 представлено систему найважливіших індикаторів, склад якої було визначено експертним шляхом. В експертизі брали участь фахівці, зокрема ті, що спеціалізуються на питаннях енергозбереження та паливно-енергетичного комплексу в межах області.

Самі по собі необроблені значення цих індикаторів не дозволяють однозначно інтерпретувати стан системи як кризовий або некризовий. Для цілей моніторингу та прийняття управлінських рішень життєво необхідним є визначення порогових значень.

Наслідуючи методологічні підходи, що застосовуються в енерго-економічній безпеці, пропонується встановити два ключові рівні порогових значень, які визначають критичні стани регіональної енергосистеми:

1. Передкризовий поріг: межа між прийнятним (нормальним) станом функціонування енергетичного комплексу та передкризовим (нестабільним) станом, що вимагає уваги та коригуючих дій.

2. Кризовий поріг: межа, що відокремлює передкризовий стан від кризового (надзвичайного або неприйнятного) стану, який загрожує сталому розвитку та вимагає негайного втручання.

Таблиця 3.2 - Систематизація показників оцінки енергетичної ефективності ТГ Кіровоградської області

№	Назва індикатора	Позначення	Порядок розрахунку (формула)	Блок
1	Індекс фізичної амортизації основних фондів	$X_1$	$X_1 = A_{\text{знос}}$	Надійність (технологічний)

№	Назва індикатора	Позначення	Порядок розрахунку (формула)	Блок
2	Коефіцієнт монозалежності паливного балансу	$X_2$	$X_2 = \frac{P_{\text{ДОМ}}}{P_{\text{ППЕР}}}$	Надійність (технологічний)
3	Питома інтенсивність споживання первинних ресурсів	$X_3$	$X_3 = \frac{P_{\text{ППЕР}}}{Z}$	Використання (споживання)
4	Обсяг питомого теплоспоживання	$X_4$	$X_4 = \frac{C_Q}{Z}$	Використання (споживання)
5	Рівень питомої електрифікації споживання	$X_5$	$X_5 = \frac{C_E}{Z}$	Використання (споживання)
6	Питома потужність теплової генерації	$X_6$	$X_6 = \frac{G_Q}{Z}$	Виробництво
7	Питома інтенсивність електрогенерації (на традиційному паливі)	$X_7$	$X_7 = \frac{G_E}{Z}$	Виробництво
8	Індекс екологічного навантаження на душу населення	$X_8$	$X_8 = \frac{W}{Z}$	Екологічний
9	Екологічна питома енергоємність (викидів)	$X_9$	$X_9 = \frac{W}{P_{\text{ППЕР}}}$	Екологічний
10	Коефіцієнт просторової емісії забруднень	$X_{10}$	$X_{10} = \frac{W}{S}$	Екологічний

№	Назва індикатора	Позначення	Порядок розрахунку (формула)	Блок
11	Коефіцієнт фінансового забезпечення екологічної безпеки інвестиції та поточні витрати на охорону зовнішнього середовища	$X_{11}$	$X_{11} = \frac{I_{\text{екол}}}{W}$	Екологічний

Для адекватного поділу доцільно визначити граничні значення індикаторів для аналізу енергетичної ефективності регіону України (табл.3.3).

Ці порогові значення відображають рекомендовані рівні, що дозволяють ідентифікувати зони ризику та вчасно реагувати на погіршення стану енергосистеми.

Таблиця 3.3. Рекомендовані граничні значення показників для аналізу енергетичної ефективності ТГ Кіровоградської області

Індикатор	Найменування	Од. вим.	Базовий орієнтир	Порогові значення
				Передкризове
Блок Надійності (Технологічний блок)				
$X_I$	Індекс фізичної амортизації основних фондів	%	0%	40%

Продовження табл.3.3

Індикатор	Найменування	Од. вим.	Базовий орієнтир	Порогові значення
$X_2$	Коефіцієнт монозалежності паливного балансу	%	30%	40%
Блок використання (Споживання)				
$X_3$	Питома інтенсивність споживання первинних ресурсів	т.у.п./особу	100%	70%
$X_4$	Норматив питомого теплоспоживання	Гкал/особу	100%	75%
$X_5$	Рівень питомої електрифікації споживання	тис. кВт·год / особу	100%	70%
Блок виробництва				
$X_6$	Питома потужність теплової генерації	Гкал/особу	100%	75%
$X_7$	Питома інтенсивність електрогенерації (на традиційному паливі)	тис. кВт·год / особу	100%	70%
Екологічний Блок				
$X_8$	Індекс екологічного навантаження на душу населення	т/особу	100%	125%
$X_9$	Екологічна питома енергоємність (викидів)	т / т.у.п.	100%	125%

Продовження табл.3.3

Індикатор	Найменування	Од. вим.	Базовий орієнтир	Порогові значення
$X_{10}$	Коефіцієнт просторової емісії забруднень	тис. т / кв. км	100%	125%
$X_{11}$	Коефіцієнт фінансового забезпечення екологічної безпеки	тис. грн / т	100%	70%

Проведений індикативний аналіз передбачає кількісне порівняння фактичних значень одинадцяти ключових індикаторів енергетичної безпеки з їхніми встановленими пороговими значеннями (передкризовим та кризовим).

#### 1. Блок надійності та стійкості ( $X_1$ та $X_2$ )

Ситуація щодо зносу основних фондів енергетики є універсальною і не повинна залежати від регіональних особливостей енергопостачання. Тому порогові значення для всіх територіальних громад Кіровоградщини залишаються єдиними: ситуація вважається передкризовою при зносі обладнання понад 40% і кризовою за показників понад 60%.

Числові значення індикатора дозволяють стверджувати, що в Кіровоградській області в цілому, а також у великих містах (наприклад, м. Кропивницький та м. Знам'янка) та окремих ТГ (наприклад, Добровеличківська ТГ), існує кризова ситуація зі зношеністю енергетичного обладнання. Особливо критичним стан був у Петрівській ТГ (оцінка в зоні F, знос понад 90% на 2012 рік). Натомість, нормальний стан спостерігається в Новоархангельській, Маловисківській та Устинівській ТГ. Відзначено покращення ситуації у Гайворонській ТГ.

Індикатор  $X_2$  важливий для забезпечення структурної безпеки, оскільки жоден вид палива не повинен критично переважати в загальному балансі ППЕР. Порогові значення є універсальними: передкризова ситуація настає

при перевищенні частки одного виду палива понад 40%, кризова — понад 60%.

Аналіз показав, що в Кіровоградській області в цілому, та у більшості ТГ, існує кризова ситуація через надмірне використання природного газу. Найгірша ситуація спостерігається у м. Світловодськ, нормальний стан було зафіксовано лише у Компаніївській, Бобринецькій та Онуфріївській ТГ, де домінуючими видами є дизельне паливо та бензин. Блок використання (споживання) ( $X_3$ ,  $X_4$  та  $X_5$ )

Числові значення індикатора  $X_3$  свідчать, що в Кіровоградській області в рівень індикатора залишалось перманентним впродовж 2017–2022 років. Однак в окремі роки ситуація у м. Олександрія, м. Долинська та Новгородківській ТГ досягала кризового стану, що вказує на недостатнє споживання енергії або значні проблеми з її обліком та розподілом.

В Кіровоградській області в цілому за показником  $X_4$  спостерігалось незначне зменшення індикатора. У м. Олександрія, м. Світловодськ, Олександрівській, Добровеличківській, Вільшанській та Благовіщенській ТГ стан зазнав стрімкої деградації та увійшов у фазу критичної небезпеки, що свідчить про глибокі проблеми в комунальній теплоенергетиці та необхідність термінової модернізації систем.

В Кіровоградській області в цілому значення індикатора  $X_5$  залишалось майже незмінним. Проте, у 2021 році ситуація в м. Олександрія досягла передкризового стану (зона С). У м. Знам'янка та Маловисківській ТГ стан вважається нормальним, але показники впритул наблизилися до передкризового стану.

## 2. Блок виробництва ( $X_6$ та $X_7$ )

Числові значення індикатора  $X_6$  свідчать, що в Кіровоградській області в цілому спостерігалось незначне зменшення відпуску. У м. Світловодськ, м. Знам'янка, Олександрівській, Добровеличківській та Вільшанській ТГ ситуація різко погіршилась і досягла кризового стану. У м. Кропивницький та Новоукраїнській ТГ було зафіксовано передкризовий стан.

В Кіровоградській області в цілому значення індикатора  $X_7$  в останні два роки почало збільшуватися. Однак кризовий стан більшості ТГ (наприклад, Компаніївська, Бобринецька, Маловисківська та інші) естермінований абсолютним дефіцитом або вкрай незначним обсягом виробництва електроенергії на базі палива в цих громадах.

#### 5. Екологічний блок ( $X_8$ , $X_9$ , $X_{10}$ та $X_{11}$ )

Узагальнені результати проведеного моніторингу свідчать про загальну негативну динаміку функціонування системи енергетичної ефективності в межах Кіровоградської області (індикатор  $X_8$ ), яка у 2021–2022 роках досягла передкризового стану. У значній кількості ТГ, таких як м. Кропивницький, м. Олександрія, Добровеличківська, Заваллівська, Петрівська та Новомиргородська ТГ, функціональна стійкість зазнала стрімкої деградації та увійшла у фазу критичної небезпеки

В Кіровоградській області в цілому спостерігалось погіршення ситуації за індикатором  $X_9$ . У 2020 та 2022 роках було досягнуто передкризового стану. Найгірший, кризовий стан, зафіксовано у м. Кропивницький, м. Олександрія, Добровеличківській, Заваллівській та Петрівській ТГ.

В Кіровоградській області в цілому спостерігалось погіршення за індикатором  $X_{10}$ , що призвело до передкризового стану у 2021–2022 роках. Як і за індикатором  $X_8$ , кризовий стан охопив такі ТГ, як м. Кропивницький, м. Олександрія, Добровеличківська, Заваллівська та Петрівська ТГ.

На території Кіровоградської області було зафіксовано лише мінімальне позитивне відхилення показника інвестиційної активності (індикатор  $X_{11}$ ). Проте, просторовий аналіз виявив радикальне погіршення інвестиційного клімату (кризовий стан) у ключових територіальних громадах: м. Олександрія, м. Світловодськ, Маловисківській та Новомиргородській ТГ.

Кризовий рівень у Компаніївській, Бобринецькій, Устинівській та Благовіщенській ТГ обумовлено майже повною відсутністю (або вкрай незначним обсягом) капітальних інвестицій та поточних витрат, спрямованих на захист довкілля.

Для комплексного оцінювання стану енергетичної безпеки територіальних громад Кіровоградської області був використаний метод підсумкової бальної оцінки. Цей метод агрегує результати індикативного аналізу (зіставлення фактичних значень індикаторів з пороговими) та дозволяє встановити ступінь кризовості для кожного об'єкта (табл. 3.4).

Таблиця 3.4. Значення підсумкової бальної оцінки для ТГ Кіровоградської області у 2022 році

Територіальні громади (ТГ) Кіровоградської області	Підсумкова бальна оцінка (ІБОРЕБ)
м. Кропивницький (обласний центр)	1,82
м. Олександрія	2,36
м. Світловодськ	2,45
м. Знам'янка	1,91
м. Новоукраїнка ТГ	2,64
м. Долинська ТГ	1,55
Благовіщенська ТГ	2,91
Добровеличківська ТГ	3,45
Гайворонська ТГ	1,55
Голованівська ТГ	2,00
Компаніївська ТГ	1,36
Петрівська ТГ	3,64
Новгородківська ТГ	3,18
Вільшанська ТГ	2,82
Устинівська ТГ	2,09
Маловисківська ТГ	2,09
Новомиргородська ТГ	2,45
Онуфріївська ТГ	2,27
Олександрівська ТГ	3,82
Бобринецька ТГ	2,55
Новоархангельська ТГ	2,55
Заваллівська ТГ	3,91
Кропивницький р-н (ТГ)	3,00
Олександрійський р-н (ТГ)	2,64
Новоукраїнський р-н (ТГ)	3,55
Бобринецький р-н (ТГ)	4,00

Таким чином, підсумкова бальна оцінка (ІБОРЕБ), отримана внаслідок класифікації індикаторів, дозволяє інтегрально встановити ступінь кризовості

енергетичної безпеки для кожної територіальної громади Кіровоградської області.

Найвищий рівень безпеки (найнижчі оцінки) демонструють Компаніївська ТГ (1,36), м. Долинська ТГ (1,55) та Гайворонська ТГ (1,55). Ці громади мають найменшу кількість індикаторів, які перебувають у передкризовій чи кризовій зонах.

Найвищий ступінь кризовості (найвищі оцінки) зафіксовано у Бобринецькому р-н ТГ (4,00), Заваллівській ТГ (3,91) та Олександрівській ТГ (3,82). Це вказує на гостру необхідність невідкладного втручання та розробки програм стабілізації енергетичного комплексу в цих громадах.

### **3.3. Аналіз енергоефективності та енергетичної ефективності регіону (на прикладі Кіровоградської області)**

У рамках цього дослідження був проведений факторний аналіз методом головних компонент (РСА) за індикаторами, що наведені, у табл. 3.1.-3.4.

Процедура розрахунку факторного аналізу:

1. Вхідні дані: використовувалася матриця початкових даних (табл. 3.6), що містить необроблені значення індикаторів енергоефективності регіональних енергетичних комплексів.

2. Нормування індикаторів: було виконано нормування початкових значень (табл. 3.5). Це є необхідною умовою для коректного використання РСА, особливо коли індикатори мають різну розмірність та діапазони.

Нормування виконувалося за формулою стандартизації:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{S_i}, \quad (3.4)$$

де  $\bar{x}_i$  — середнє значення  $i$ -го індикатора, а  $S_i$  — стандартне відхилення  $i$ -го індикатора. Це забезпечує, що нормовані змінні  $z_{ij}$  мають середнє значення 0 та стандартне відхилення 1.

3. Обробка: всі розрахунки факторного аналізу були виконані за допомогою статистичного пакета, STATISTICA 6.1.

Для м. Кропивницький:

$$\sum x_{1,j} = 1358,00$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1358,00}{26} \approx 52,2308$$

$$\sum (x_{1,j} - \bar{x}_1)^2 \approx 8485,3077$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{8485,3077}{26}} \approx 18,0563$$

$$z_{1,\text{Кроп.}} = \frac{70,5000 - 52,2308}{18,0563} = \frac{18,2692}{18,0563} \approx 1,01178$$

Для визначення статистичної значущості обчисленого коефіцієнта кореляції Пірсона ( $r_{xy}$ ) між індикаторами використовується  $t$ -критерій Ст'юдента. Обчислюється спостережуване значення критерію:

$$t_{\text{спост}} = r_{xy} \sqrt{\frac{N-2}{1-r_{xy}^2}}$$

де  $r_{xy}$  — вибірковий коефіцієнт кореляції, а  $\nu = N - 2$  — кількість ступенів свободи (тут  $N=26$ ).

Коефіцієнт кореляції вважається статистично значущим, якщо виконується умова:

$$|t_{\text{спост}}| \geq t_{\text{крит.}}$$

Для виявлення раціональної кількості головних компонент (латентних факторів) було застосовано метод головних компонент (РСА). Рішення про кількість факторів приймалося на основі критерію відсіювання Каттелла (Scree Plot criterion).

Таблиця 3.5. Динаміка ключових індикаторів енергоефективності Кіровоградської області

Індикатор	м. Кропивницький	м. Олександрія	м. Світловодськ	м. Знам'янка	м. Новоукраїнка ТГ	м. Долинська ТГ	Компаніївська ТГ	Бобринецька ТГ	Новоархангельська ТГ
$X_{11}$	1,1996	1,3266	2,646	2,5906	1,7123	1,458	0,0797	-0,0009	1,1996
$X_{10}$	0,6949	0,1187	0,1019	0,0905	0,1107	0,1497	0,0024	0,0014	0,6949
$X_9$	0,0187	0,0453	0,0233	0,0234	0,0428	0,0305	0,0668	0,0563	0,0187
$X_8$	0,1684	0,064	0,0703	0,0689	0,0809	0,0677	0,0669	0,074	0,1684
$X_7$	2,3416	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,1404	-0,0009	-0,0009	2,3416
$X_6$	12,9598	3,2952	1,7965	3,8725	2,2906	3,7222	0,3062	0,3517	12,9598
$X_5$	4,1333	1,0428	1,1336	1,1519	1,713	0,8139	0,2517	0,2146	4,1333
$X_4$	8,5526	1,5303	1,8847	1,9279	0,7487	2,1145	0,3084	0,1759	8,5526
$X_3$	8,6356	1,4019	2,9369	2,8751	1,8695	2,1872	0,9993	1,3074	8,6356
$X_2$	81,9789	83,1856	90,2192	78,8416	65,5804	82,6876	70,3448	70,295	81,9789
$X_1$	70,4991	54,5991	54,1991	49,8991	67,5991	43,1991	43,8991	52,5991	70,4991

Продовження табл. 3.5.

Індикатор	Маловисківська ТГ	Новомиргородська ТГ	Олександрівська ТГ	Добровеличківська ТГ	Вільшанська ТГ	Гайворонська ТГ	Голованівська ТГ	Новгородківська ТГ	Онуфріївська ТГ
$X_{11}$	0,8	0,1931	0,1063	0,078	-0,0011	-0,0011	0,0862	-0,0011	0,8
$X_{10}$	0,0019	0,0028	0,002	0,0073	0,0015	0,0022	0,0019	0,0017	0,0019
$X_9$	0,0382	0,1178	0,0439	0,2232	0,0941	0,05	0,1278	0,0938	0,0382
$X_8$	0,0605	0,1352	0,0725	0,528	0,07	0,0654	0,0836	0,0748	0,0605
$X_7$	-0,0011	0,2272	0,0362	0,0031	-0,0011	0,105	-0,0011	0,1015	-0,0011
$X_6$	1,1495	2,2172	1,6181	9,2452	1,4511	1,7341	0,5725	2,0603	1,1495
$X_5$	0,3661	0,8908	0,3986	4,5118	1,2002	0,4165	0,6297	0,4515	0,3661
$X_4$	0,8989	2,2265	1,7129	9,2454	1,4511	1,4286	0,5719	1,8803	0,8989
$X_3$	1,5668	1,1447	1,6352	2,3581	0,7464	1,3001	0,6559	0,7981	1,5668
$X_2$	71,8789	43,2849	79,9194	86,592	41,3688	66,1717	33,3812	44,2535	71,8789
$X_1$	57,9989	51,2989	54,9989	48,6989	39,0989	55,9989	46,8989	37,5989	57,9989

Продовження табл. 3.5.

Індикатор	Петрівська ТГ	Устинівська ТГ	Благовіщенська ТГ	Заваллівська ТГ	Кропивницький р-н (ТГ)	Олександрійський р-н (ТГ)	Новоукраїнський р-н (ТГ)	Бобринецький р-н (ТГ)
$X_{11}$	0,00138	-0,0014	0,0665	0,00672	0,2957	0,6739	0,0247	-0,0014
$X_{10}$	0,0015	0,0021	0,0007	0,004	0,0025	0,0004	0,003	0,0017
$X_9$	0,1536	0,0472	0,0644	0,2186	0,1455	0,1395	0,1173	0,0798
$X_8$	0,0753	0,0865	0,0638	0,0908	0,0808	0,07	0,158	0,0744
$X_7$	-0,0014	0,1059	-0,0014	-0,0012	-0,0014	-0,0014	-0,0014	-0,0013
$X_6$	0,0022	1,4346	0,071	0,4972	1,6124	0,9152	0,538	0,5962
$X_5$	0,3792	0,7748	0,3061	0,3599	0,6842	0,3713	0,8187	0,3748
$X_4$	0,0022	1,4359	0,1025	0,3783	1,4833	0,5743	0,402	0,5962
$X_3$	0,4935	1,8068	0,9896	0,4176	0,5584	0,5055	1,3407	0,9315
$X_2$	33,5661	80,6363	47,5748	37,0934	55,5009	37,6748	62,9323	73,0913
$X_1$	45,8986	54,2986	32,6986	95,9986	46,9986	42,9986	44,5986	51,4986

Таблиця 3.6. Нормовані величини індикаторів енергетичної ефективності Кіровоградської області (фрагмент)

Індикатор	м. Кропивницький	м. Олександрія	м. Світловодськ	м. Знаменка	м. Новоукраїнка ТГ	м. Долинська ТГ	Компаніївська ТГ	Бобринецька ТГ	Новоархангельська ТГ
$X_5$	3,15	0,025	0,27	0,119	0,698	-0,183	-0,75	-0,610	-0,199
$X_4$	3,20	-0,150	0,011	0,158	-0,500	0,250	-0,72	-0,751	0,103
$X_3$	4,55	-0,085	0,735	0,861	0,205	0,288	-0,47	-0,266	0,107
$X_2$	0,95	1,180	1,592	0,915	0,191	0,999	0,457	0,305	-0,105
$X_1$	1,01178	0,195	0,297	-0,088	1,224	-0,735	-0,68	0,153	-0,56

Таблиця 3.7. Кореляційна матриця

$N$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$
$X_1$	1,000	0,131	0,265	0,123	0,201	0,211	0,299	0,042	0,135	0,347	0,181
$X_2$	0,131	1,000	0,545	0,447	0,392	0,453	0,227	0,234	-0,567	0,348	0,473
$X_3$	0,265	0,545	1,000	0,736	0,705	0,839	0,883	0,266	-0,404	0,929	0,436
$X_4$	0,123	0,447	0,736	1,000	0,957	0,933	0,629	0,767	0,113	0,625	0,165
$X_5$	0,201	0,392	0,705	0,957	1,000	0,904	0,589	0,775	0,119	0,653	0,228
$X_6$	0,211	0,453	0,839	0,933	0,904	1,000	0,786	0,634	-0,058	0,788	0,298
$X_7$	0,299	0,227	0,883	0,629	0,589	0,786	1,000	0,162	-0,266	0,957	0,165
$X_8$	0,042	0,234	0,266	0,767	0,775	0,634	0,162	1,000	0,523	0,089	-0,146
$X_9$	0,135	-0,567	-0,404	0,113	0,119	-0,058	-0,266	0,523	1,000	-0,373	-0,507
$X_{10}$	0,347	0,348	0,929	0,625	0,653	0,788	0,957	0,089	-0,373	1,000	0,425
$X_{11}$	0,181	0,473	0,436	0,165	0,228	0,298	0,165	-0,146	-0,507	0,425	1,000

Таблиця 3.8. Матриця факторних навантажень (метод Головних компонент, без обертання)

Індикатор	Фактор 1 (виробничо-енергетичний)	Фактор 2 (екологічно-інвестиційний)	Фактор 3 (технологічно-стійкісний)
$X_1$	-0,303	-0,03837	0,547551
$X_2$	-0,55872	-0,34891	-0,58279
$X_3$	-0,94082	-0,25644	0,112909
$X_4$	-0,89319	0,385357	-0,14237
$X_5$	-0,89082	0,376798	-0,12721
$X_6$	-0,96922	0,16786	-0,03126
$X_7$	-0,82472	-0,13896	0,452082
$X_8$	-0,51293	0,77423	-0,3265
$X_9$	0,209514	0,889927	0,227522
$X_{10}$	-0,87528	-0,29163	0,318471
$X_{11}$	-0,40724	-0,57968	-0,277
Доля загальної дисперсії	0,522	0,213	0,112
Сумарна пояснена дисперсія			84,6%

1. Головна компонента  $F_1$  — виробничо-енергетичний фактор (52,2%): об'єднує індикатори  $X_3$ - $X_7$ ,  $X_{10}$ . Характеризує інтенсивність використання енергетичних ресурсів та пов'язане з цим забруднення.

2. Головна компонента  $F_2$  — екологічно-інвестиційний Фактор (21,3%): Об'єднує індикатори  $X_8, X_9, X_{11}$ . Відображає прямий екологічний вплив (викиди) та інвестиції в його зменшення.

3. Головна компонента  $F_3$  — технологічно-стійкісний фактор (11,2%): об'єднує індикатори  $X_1, X_2$ . Характеризує технічний стан енергосистеми  $X_1$  та структурну стійкість паливного балансу  $X_2$ .

Таблиця 3.9. Значення факторних оцінок (Факторні значення) для ТГ Кіровоградської області\*

Об'єкт (ТГ Кіровоградської області)	Виробничо-енергетичний ( $F_1$ )	Екологічно-інвестиційний ( $F_2$ )	Технологічно-стійкісний ( $F_3$ )
м. Кропивницький	-4,05591	-0,65721	2,22942
м. Олександрія	-0,25526	-0,79772	-0,64918
м. Світловодськ	-0,51773	-1,47393	-1,26335
м. Знам'янка	-0,54117	-1,28976	-1,14838
м. Новоукраїнка ТГ	-0,292	-0,75092	0,11288
м. Долинська ТГ	-0,42061	-0,98536	-0,93903
Компаніївська ТГ	0,52781	-0,29345	-0,36194
Бобринецька ТГ	0,46555	-0,35879	-0,05222
Новоархангельська ТГ	0,14418	-0,16093	-0,24548
Маловисківська ТГ	0,21709	-0,71542	-0,18562
Новомиргородська ТГ	0,16921	0,71992	0,56398
Олександрівська ТГ	0,13151	-0,41522	-0,34209
Добровеличківська ТГ	-1,85477	3,71071	-2,31001
Вільшанська ТГ	0,46595	0,44719	0,14679
Гайворонська ТГ	0,24468	-0,25607	0,17282
Голованівська ТГ	0,68207	0,58109	0,788
Новгородківська ТГ	0,45787	0,35694	0,13386
Онуфріївська ТГ	0,30432	-0,32517	-0,04187
Петрівська ТГ	0,84444	0,66902	0,9282
Устинівська ТГ	0,06333	-0,30019	-0,33945
Благовіщенська ТГ	0,72298	-0,12144	-0,16216

Продовження табл. 3.9.

Об'єкт (ТГ Кіровоградської області)	Виробничо-енергетичний ( $F_1$ )	Екологічно-інвестиційний ( $F_2$ )	Технологічно-стійкісний ( $F_3$ )
Заваллівська ТГ	0,58875	1,10038	2,7886
Кропивницький р-н (ТГ)	0,43371	0,55313	0,15325
Новоукраїнський р-н (ТГ)	0,37283	0,52833	-0,26791
Бобринецький р-н (ТГ)	0,44006	-0,13055	-0,15001

Для інтегрального оцінювання потенціалу енергетичної безпеки запропоновано використовувати таксонометричний індикатор ( $T_j$ ), який є комплексною, агрегованою величиною, що враховує багатовимірність вихідних даних.

Алгоритм розрахунку таксонометричного індикатора:

1. Крок 1. Визначення еталона енергетичної безпеки: еталонний об'єкт  $E$  формується шляхом вибору найкращих (бажаних) значень для кожного  $i$ -го індикатора енергетичної безпеки серед усіх  $n$  об'єктів.
2. Крок 2. Обчислення евклідової відстані до еталона: розрахунок елементів матриці відстаней  $d_j$  виконується з використанням евклідової відстані між  $j$ -тим об'єктом та еталоном  $E$ :

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_{ij} - e_i)^2}.$$

3. Крок 3. Розрахунок таксонометричного індикатора (рівня безпеки): евклідові відстані  $d_j$  слугують початковими даними для обчислення таксонометричного індикатора ( $T_j$ ):

$$T_j = \frac{d_j}{\bar{d} + 2S_d},$$

де  $\bar{d}$  — середнє арифметичне значення евклідових відстаней, а  $S_d$  — стандартне відхилення евклідових відстаней.

Таблиця 3.10. Результати розрахунку евклідової відстані для ТГ Кіровоградської області (за даними 2022 року)

№	Територіальні громади (ТГ) Кіровоградської області	Значення евклідової відстані $d_j$	Таксонометричний індикатор ( $T_j$ )
1	Новомиргородська ТГ	2,45	0,2089
2	Новоархангельська ТГ	3,46	0,2950
3	м. Долинська ТГ	5,10	0,4347
4	м. Кропивницький	5,20	0,4433
5	Маловисківська ТГ	6,24	0,5319
6	Гайворонська ТГ	6,32	0,5387
7	Онуфріївська ТГ	6,32	0,5387
8	м. Знам'янка	6,48	0,5524
9	Голованівська ТГ	7,21	0,6146
10	м. Олександрія	7,68	0,6547
11	Новгородківська ТГ	7,87	0,6709
12	Устинівська ТГ	7,94	0,6768
13	м. Світловодськ	8,00	0,6820
14	м. Новоукраїнка ТГ	8,25	0,7033
15	Благовіщенська ТГ	8,31	0,7084
16	Кропивницький р-н (ТГ)	8,37	0,7135
17	Компаніївська ТГ	8,43	0,7186
18	Олександрійський р-н (ТГ)	8,72	0,7433
19	Вільшанська ТГ	9,59	0,8175
20	Добровеличківська ТГ	10,49	0,8942
21	Олександрівська ТГ	10,54	0,8985
22	Новоукраїнський р-н (ТГ)	10,58	0,9019
23	Бобринецька ТГ	10,63	0,9062
24	Бобринецький р-н (ТГ)	11,45	0,9761
25	Заваллівська ТГ	11,58	0,9871
26	Петрівська ТГ	11,62	0,9905

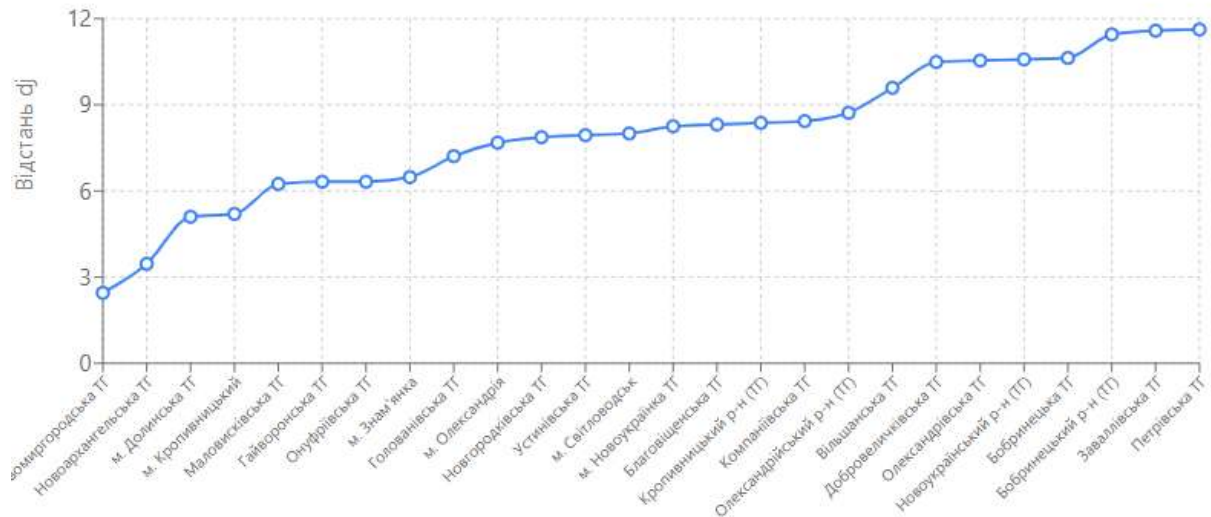


Рисунок 3.2 - Евклідова відстань  $d_j$  до еталону

Отже, кількість об'єктів ( $N$ ) = 26, сума відстаней ( $\sum d_j$ ) = 205,80,

$$\bar{d} = \frac{\sum d_j}{N} = \frac{205,80}{26} \approx 7,91538$$

Сума квадратів відхилень:

$$\sum (d_j - \bar{d})^2 \approx 94,62923$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (d_j - \bar{d})^2}{N}} = \sqrt{\frac{94,62923}{26}} \approx \sqrt{3,63958} \approx 1,90776$$

$$\bar{d} + 2S_d \approx 7,91538 + 2 \times 1,90776 \approx 7,91538 + 3,81552 \approx 11,73090$$

Новомиргородська ТГ (лідер), значення евклідової відстані ( $d_j$ ) становить 2,45:

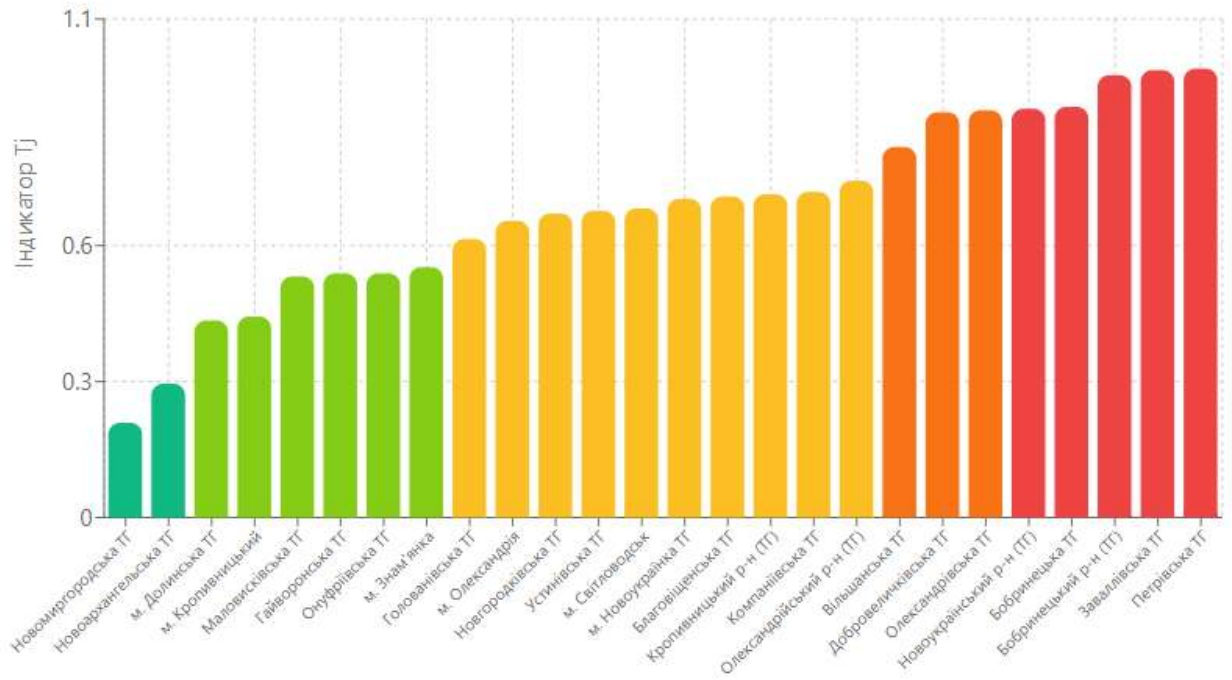
$$T_j = \frac{2,45}{11,73090} \approx 0,208855$$

м. Кропивницький (обласний центр):

$$T_{\text{Кроп.}} = \frac{d_j}{\bar{d} + 2S_d} = \frac{5,20}{11,73090} \approx 0,443274$$

Петрівська ТГ (найгірший стан):

$$T_{\text{Петр.}} = \frac{d_j}{\bar{d} + 2S_d} = \frac{11,62}{11,73090} \approx 0,990541$$



#### Легенда рівнів енергобезпеки

- Високий (<0.40)
- Добрий (0.40-0.60)
- Середній (0.60-0.75)
- Низький (0.75-0.90)
- Критичний (≥0.90)

Рисунок 3.3 - Таксонометричний індикатор  $T_j$  для всіх громад

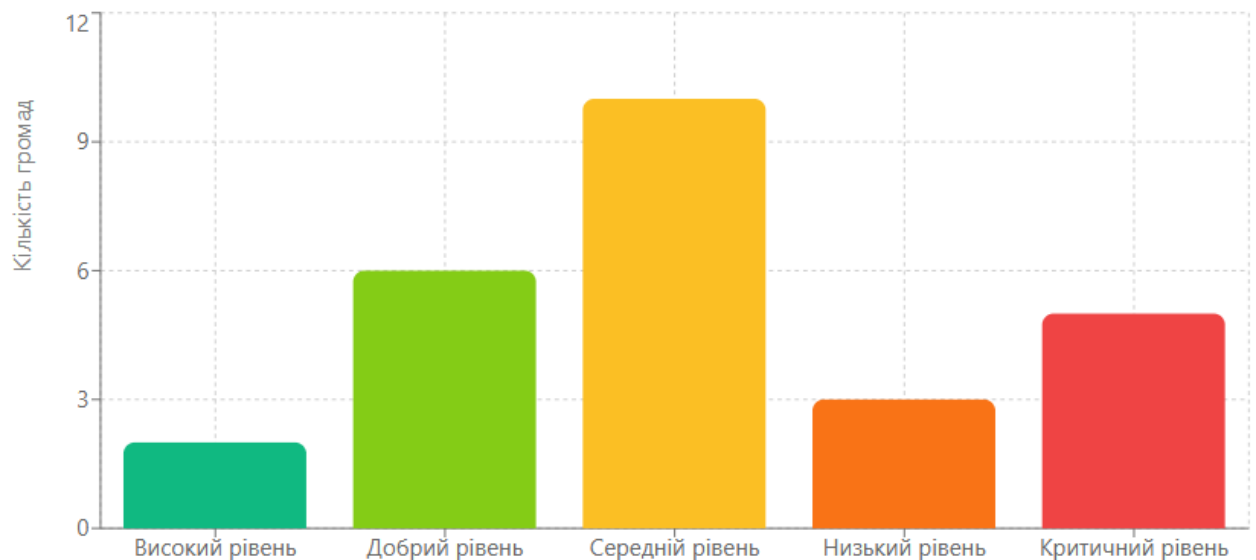


Рисунок 3.4 - Розподіл громад за рівнями енергобезпеки (кількісно)

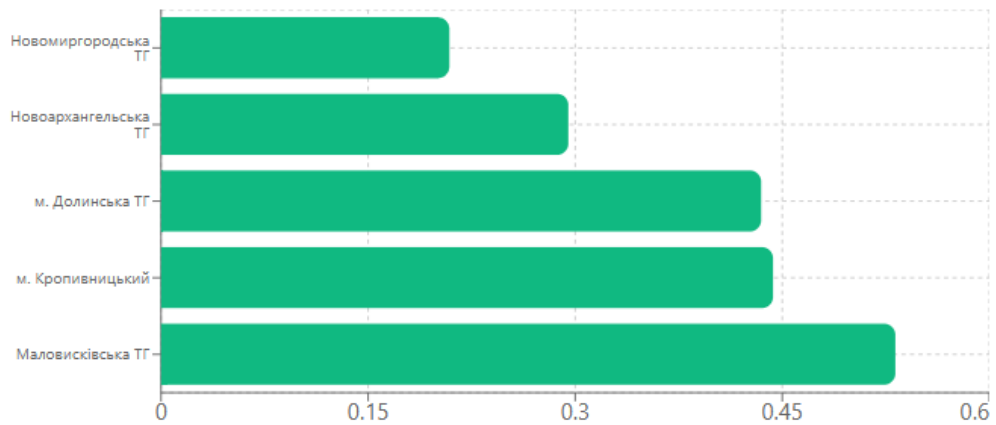


Рисунок 3.4 - Порівняння лідерів та аутсайдерів (топ 5 громад - найкращі)

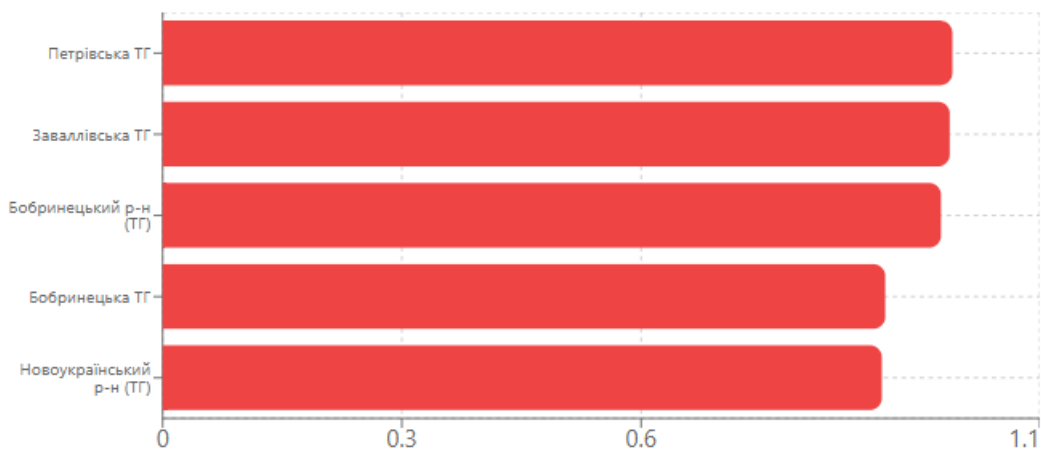


Рисунок 3.4 - Порівняння лідерів та аутсайдерів 5 громад з найгіршими показниками

### Висновки до розділу 3

1. Метод головних компонент (РСА) виявився високоефективним, дозволивши звести 11 вихідних індикаторів до трьох латентних факторів (головних компонент), які спільно пояснюють 84,6% загальної дисперсії вихідних даних. Це підтверджує, що вихідні показники є значно корельованими та можуть бути об'єднані у меншу кількість узагальнених характеристик.

2. Виділені три фактори відображають різні, але взаємопов'язані аспекти енергетичної безпеки:  $F_1$  — виробничо-енергетичний фактор (52,2% дисперсії): Є домінуючим і відображає інтенсивність використання енергетичних ресурсів та екологічне навантаження. Це вказує на те, що рівень

енергоспоживання, ефективність використання палива та ресурсна залежність є найбільшими рушіями стану енергетичної безпеки в області;  $F_2$  — екологічно-інвестиційний фактор (21,3% дисперсії): Формує окрему площину аналізу, пов'язану з прямими екологічними викидами ( $X_8$ ,  $X_9$ ) та інвестиціями ( $X_{11}$ );  $F_3$  — технологічно-стійкісний фактор (11,2% дисперсії): Вказує на важливість технічного стану енергосистем ( $X_7$ ) та структури паливного балансу ( $X_2$ ) як самостійного аспекту безпеки.

3. За факторними оцінками, м. Кропивницький отримав найбільш негативну оцінку за  $F_1$  (-4,05658). Це свідчить про найвище, порівняно з іншими ТГ, навантаження за показниками інтенсивного споживання енергоресурсів та пов'язаного з ним забруднення, що є типовим для великих адміністративних і промислових центрів.

4. Розрахунок евклідової відстані ( $d_j$ ) до ідеального (еталонного) стану дозволив об'єктивно ранжувати територіальні громади за інтегральним рівнем енергетичної безпеки. Найкращі показники енергетичної безпеки (найменша відстань до еталона) продемонстрували Новомиргородська ТГ ( $d_j = 2,45$ ) та Новоархангельська ТГ ( $d_j=3,46$ ). Ці громади, ймовірно, мають найоптимальніше співвідношення енергоспоживання, ресурсного забезпечення та екологічного навантаження. Найгірші показники (найбільша відстань до еталона) зафіксовані у Петрівській ТГ ( $d_j = 11,62$ ), Заваллівській ТГ ( $d_j = 11,58$ ) та Бобринецькій р-н ТГ ( $d_j = 11,45$ ). Це вказує на те, що саме ці громади мають критично низький потенціал енергетичної безпеки і потребують негайної розробки та впровадження комплексних програм енергоефективності та модернізації інфраструктури.

5. Результати аналізу слугують надійним емпіричним підґрунтям для пріоритезації інвестицій (інвестиційні та управлінські зусилля слід зосередити в громадах з найвищою евклідовою відстанню (наприклад, Петрівська, Заваллівська та Бобринецька ТГ); а також для впровадження системи сфокусованого управління.

## РОЗДІЛ 4.

### РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

#### **4.1. Інтервально-кластерний підхід до оцінки енергоефективності територіальних одиниць**

Аналіз структурних характеристик систем опалення та енергопостачання домогосподарств є критично важливим для розуміння загального рівня енергоефективності регіональних енергетичних комплексів. Порівняльне інтервальне оцінювання індикаторів за 2016–2020 рр. дозволяє виявити стійкі тенденції та регіони, де необхідне першочергове впровадження заходів із заміщення ресурсів та термомодернізації.

Наявність і динаміка централізованого та індивідуального опалення є прямими індикаторами технологічної залежності та потенціалу для децентралізації.

На рис. 4.1 зображено рівень поширеності централізованого опалення в регіонах України протягом 2017–2021 рр. Аналіз показав, що:

1) Протягом усього п'ятирічного періоду м. Київ демонструвало стабільно високий рівень охоплення централізованим опаленням, що практично залишається на позначці 100%. Це свідчить про високу залежність столичного енергокомплексу від роботи ТЕЦ та магістральних мереж, хоча і виявляє незначне зниження.

2) Середній рівень покриття утримувався у шести промислово розвинених регіонах: Дніпропетровській, Донецькій, Запорізькій, Одеській, Полтавській та Харківській областях. У цих регіонах існує значний потенціал для впровадження когенераційних установок та підвищення ефективності централізованих мереж.

3) Тенденції до децентралізації (перехід до низького рівня): зміни у частці централізованого опалення відбулися у трьох ключових регіонах. Зокрема, у Київській області охоплення знизилося від середнього до низького рівня у 2020–2021 роках. Розбіжність даних між 2020 і 2021 роками може

бути спричинена методологічними неточностями при зборі інформації шляхом опитування домогосподарств.

Миколаївська область демонструвала рівномірне зниження охоплення, досягнувши мінімально зафіксованого значення у 2020 році.

У Сумській області зафіксовано різке падіння відсотку до низького рівня у 2021 році.

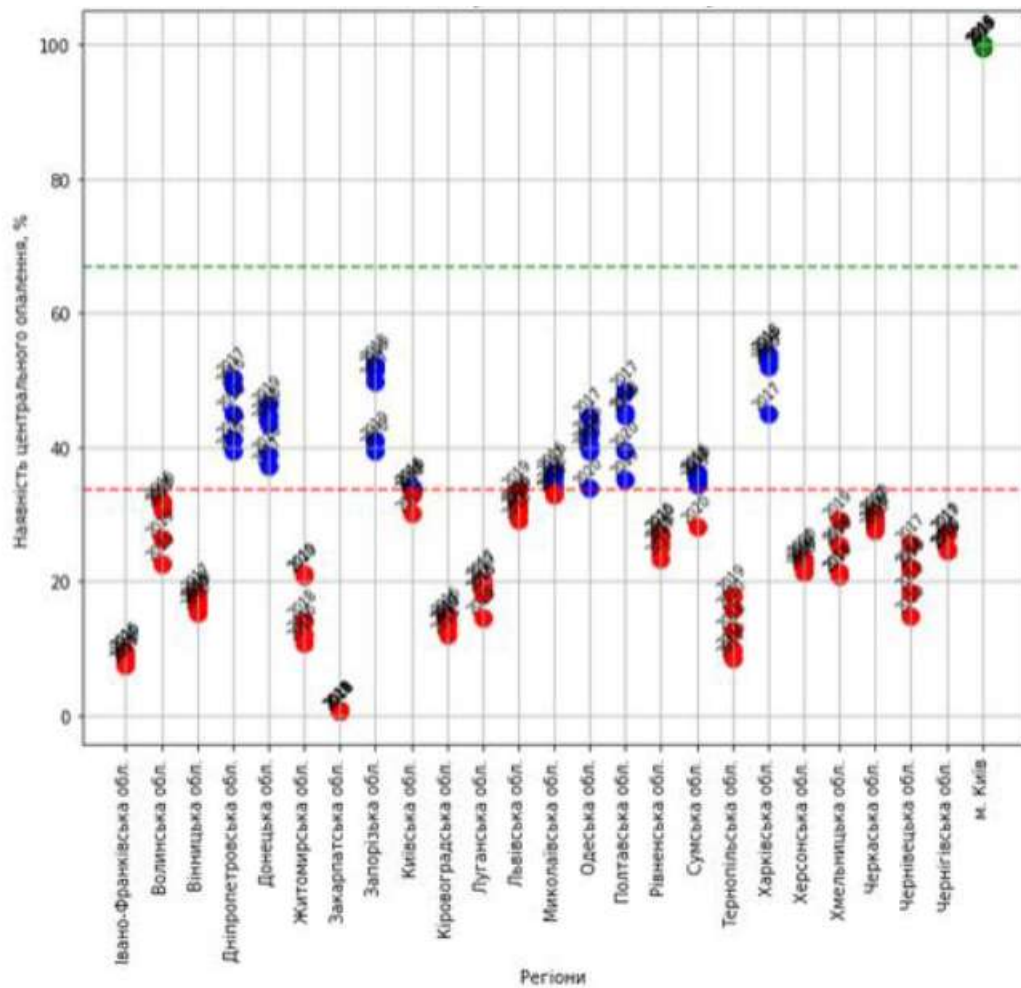


Рисунок 4.1 – Розподіл показників забезпечення регіонів України централізованим опаленням впродовж періоду 2017–2021 рр.

У решті регіонів країни наявність централізованого опалення стабільно залишалася на низькому рівні, що свідчить про історичну орієнтацію на індивідуальні системи.

Для порівняння, на рис. 4.2 представлено динаміку поширеності індивідуальних систем опалення в регіонах протягом 2017–2021 рр.

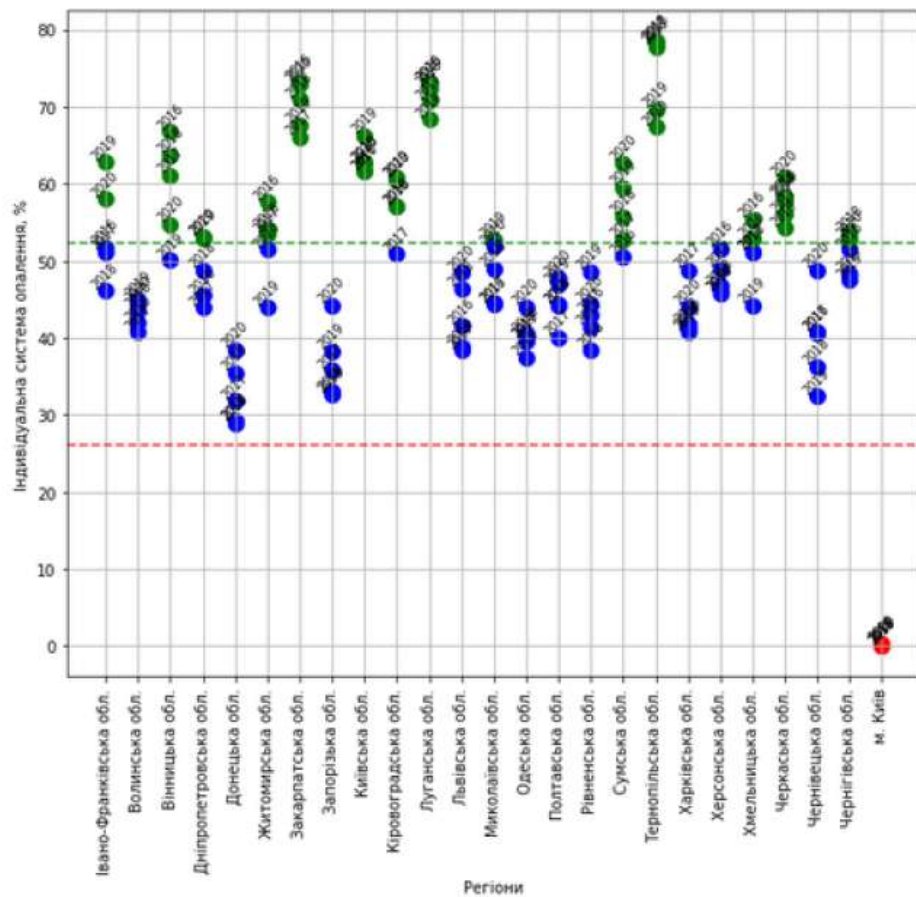


Рисунок 4.2 – Динаміка поширення індивідуального опалення у регіональному розрізі впродовж 2017-2021 рр.

Протягом досліджуваного періоду була виявлена стійка, явно виражена тенденція до зростання частки індивідуального опалення у групі областей, що охоплює Івано-Франківську, Миколаївську, Дніпропетровську та Сумську адміністративно-територіальні одиниці. Особливо виражений перехід до індивідуалізованої системи теплозабезпечення (децентралізації теплопостачання) зафіксовано в Сумській та Миколаївській областях, що є вагомим свідченням посилення індивідуалізації на регіональному ринку комунальних послуг.

У п'яти областях центральної України (зокрема й Кіровоградській) спостерігалися нерівномірні коливання показників, що балансували між середнім та високим значенням частки індивідуального опалення. Така волатильність (нестабільність) може бути спричинена методологічними особливостями або неоднорідністю даних опитувань домогосподарств, що

вимагає додаткового аналізу джерел інформації.

У решті адміністративно-територіальних одиниць частка індивідуального опалення переважно зберігала середній рівень. Незважаючи на це, була відзначена загальна, хоча й помірна, тенденція до збільшення її відсоткового показника протягом всього досліджуваного періоду. Це вказує на масштабний вектор децентралізації теплозабезпечення, який є характерним для більшості регіонів країни на національному рівні.

Енергоефективність житлового сектору нерозривно пов'язана зі структурою паливного балансу та потребами в теплі, які диктуються кліматом.

Аналіз рівня забезпечення регіонів централізованим газопостачанням протягом 2017–2021 рр. наведено на рисунку 4.3.

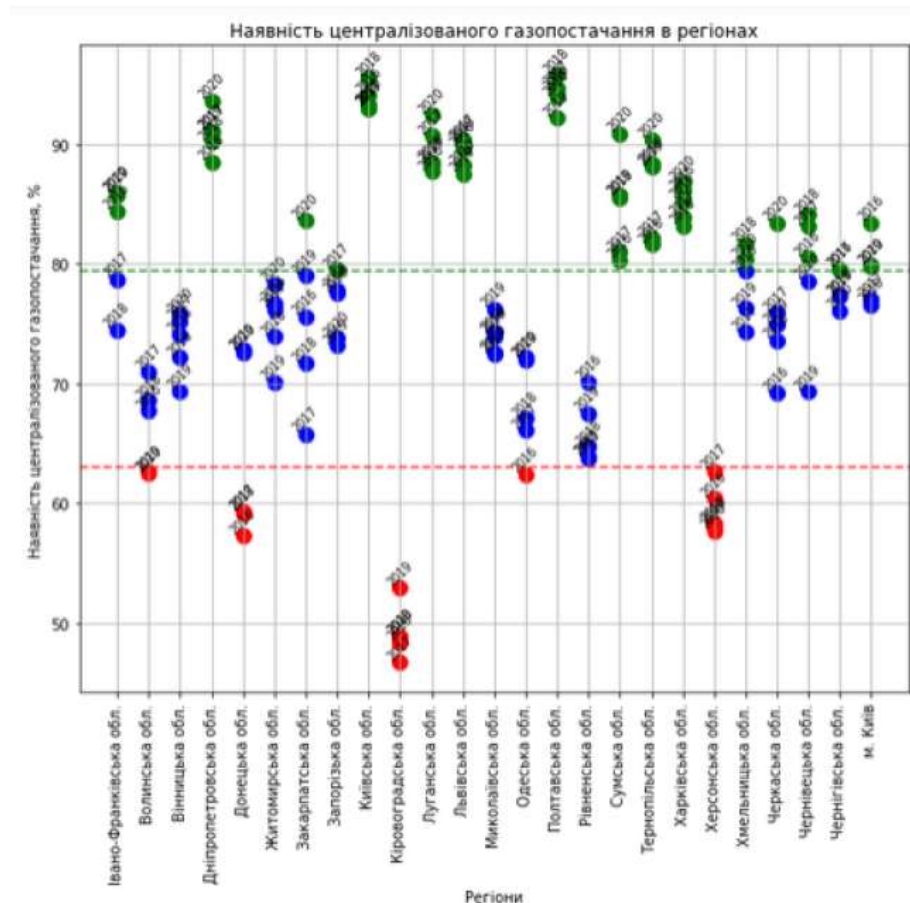


Рисунок 4.3 – Динаміка поширення централізованого газопостачання у регіональному розрізі (2017–2021 рр.).

У Кіровоградській та Херсонській областях центральне газопостачання стабільно утримувалося на низькому рівні. Ця стійка тенденція свідчить про підвищену залежність цих регіонів від альтернативних джерел енергії або використання скрапленого газу.

Значна частина областей демонструє стабільно високий відсоток охоплення централізованим газопостачанням. До цієї групи входять: Дніпропетровська, Київська, Полтавська, Сумська, Тернопільська та інші області. Саме у цих регіонах найбільш доцільним є пріоритетне впровадження заходів із заміщення природного газу (дегазації) з метою зниження імпортозалежності та підвищення енергетичної стійкості національного енергетичного комплексу.

Середній рівень охоплення газопостачанням підтримувався у Вінницькій, Миколаївській та Рівненській областях. Стійкий перехід з низького до середнього рівня зафіксовано у Донецькій (зростання відбулося у 2020 р.) та Одеській (збільшення у 2018 р.) областях. Коливання між середнім та високим значенням показника зареєстровані у Закарпатській (де рівень зріс до високого у 2021 р.), Чернівецькій та Чернігівській областях (де, навпаки, рівень знизився).

Запорізька, Івано-Франківська, Хмельницька області та м. Київ демонстрували нерівномірні зміни показників між середнім та високим значеннями. Така неоднорідна динаміка може бути індикатором нестабільності вихідних даних або наслідком швидких структурних змін у регіональних газорозподільних мережах.

Аналіз динаміки споживання та необхідності заміщення газу повинен супроводжуватися оцінкою кліматичних факторів. Середня температура опалювального періоду є важливим параметром, який безпосередньо впливає на обсяги споживання енергії.

На рисунку 4.4 відображена динаміка середніх значень температур опалювального періоду по регіонах протягом 2017–2021 рр. Цей індикатор є ключовим для оцінки потреби в теплі та прогнозування енергоспоживання.

Переважає більшість регіонів протягом досліджуваного періоду зафіксували всі три рівні середньої температури. Графік підтверджує, що 2010 та 2021 роки виявилися найспекотнішими роками опалювального періоду, що об'єктивно сприяло зниженню загального споживання палива.

Області з найнижчою температурою, де домінували низький та середній рівні, – Сумська та Чернігівська.

Регіони з найвищою середньою температурою опалювального періоду, де домінували середній та високий рівні, – Одещина, Миколаївщина та Херсонщина.

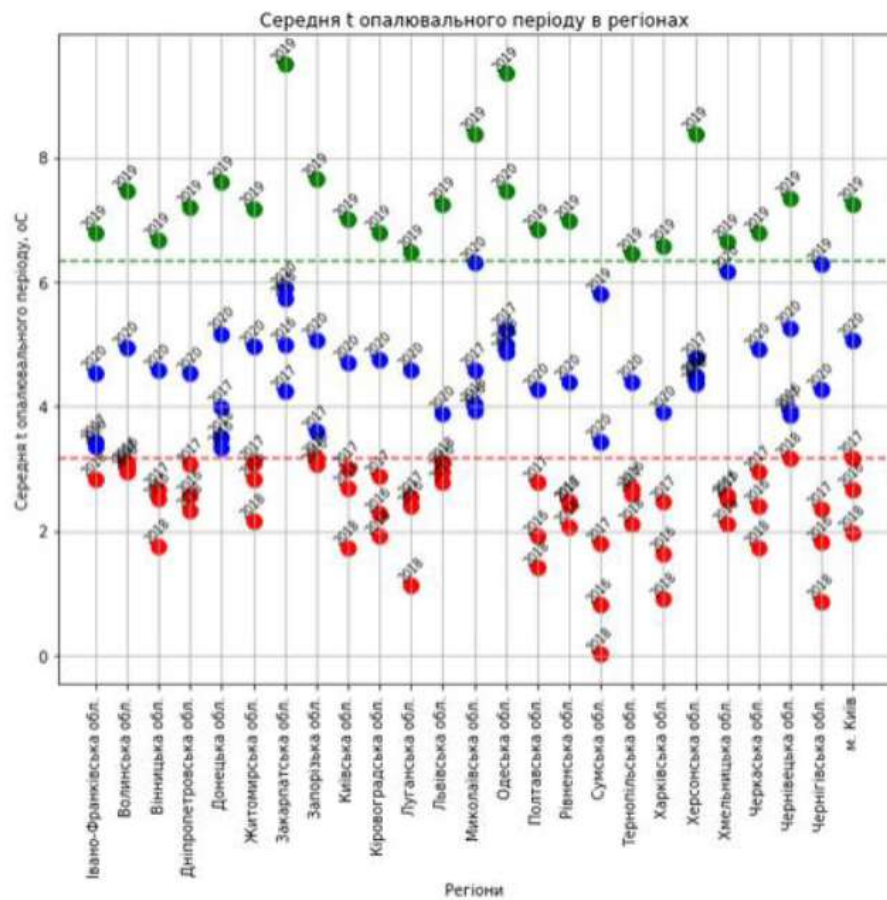


Рисунок 4.4 – Значення середньої температура за опалювальний період в регіонах впродовж 2017-2021 рр.

## 4.2. Аналіз структури споживання енергоресурсів та соціально-економічних індикаторів у житловому секторі (2017–2021 рр.)

Аналіз споживання основних видів палива на опалення одиниці житла є прямим індикатором ефективності теплоізоляції будівель та результативності програм термомодернізації.

Динаміку питомого споживання природного газу на опалення одиниці житлового фонду в регіональному розрізі (2017–2021 рр.) представлено на рисунку 4.5.

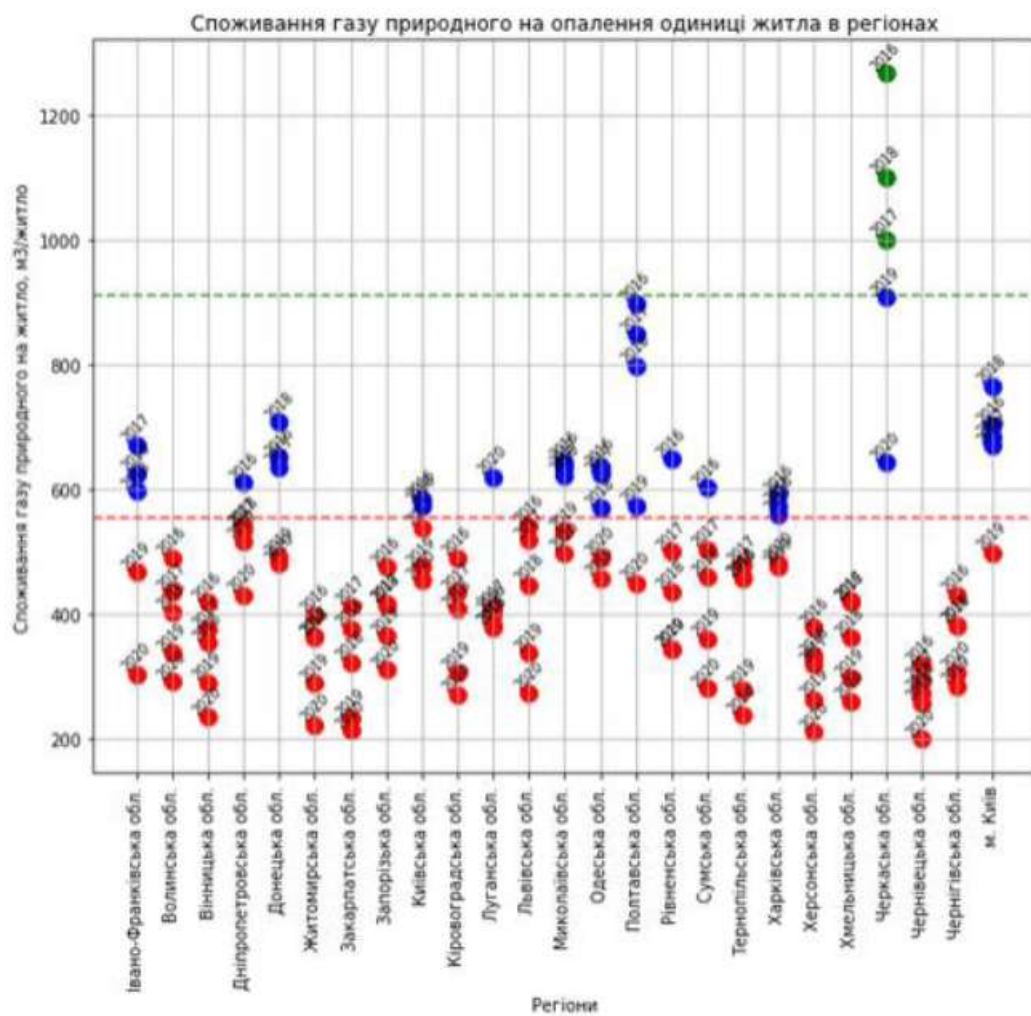


Рисунок 4.5 – Регіональні відмінності у споживанні природного газу на опалення одиниці житла (2017–2021 рр.).

Аналіз показав, що значна частина регіонів, що вказує на відносно високу ефективність або мале охоплення газовим опаленням, демонструвала низький рівень споживання протягом п'яти років: Волинська, Житомирська,

Запорізька, Кіровоградська, Тернопільська, Хмельницька тощо. Черкаська область виділялася найбільшим споживанням серед усіх регіонів. Проте, фіксується позитивна тенденція: значення знизилося з високого рівня до середнього рівня, починаючи з 2020 року.

Виявлена редукція споживання природного газу є ймовірним наслідком імплементації комплексних заходів з підвищення енергоефективності та, водночас, структурних змін у системі теплозабезпечення. Такі структурні зсуви можуть бути спричинені як підвищенням термічного опору огорожувальних конструкцій будівель (теплоізоляцією), так і активною заміною газових систем опалення на альтернативні, негазові джерела енергії (тверде паливо, теплові насоси тощо). Була зафіксована диференційована хронологія зниження споживання газу:

- Після 2020 року. Перехід із середнього на низький рівень споживання газу відзначено у групі областей західного та південно-східного регіонів: Івано-Франківська, Донецька, Миколаївська, Одеська та Харківська області.

- Рання дегазація. У Рівненській області, а також на Сумщині та Дніпропетровщині відбулось аналогічне зниження до низької позначки відбулося раніше — починаючи з 2018 року.

У низці регіонів спостерігалася неоднорідна динаміка споживання з епізодичними коливаннями:

- Київська область утримувалася переважно на низькому рівні, за винятком 2017 та 2019 років, коли рівень досягав середньої позначки.

- У Луганській області споживання також було стабільно низьким, окрім різкого зростання до середнього рівня у 2021 році.

- У Полтавській області зафіксовано рівномірне зниження від середнього до низького рівня (досягнуто у 2021 році).

- м. Київ переважно зберігав середній рівень споживання, за винятком 2020 року, коли було зафіксовано тимчасове падіння до низької позначки.

На рисунку 4.6 зображено споживання теплової енергії на опалення одиниці житла за окремими областями впродовж 2017–2021 рр. Переважно, рівень споживання теплової енергії у більшості регіонів залишався на низькому рівні. Винятком є Закарпатська область, де споживання мало високий рівень, хоча після 2018 року почало знижуватися. Це може бути пов'язано з інтенсивною термомодернізацією або переходом на інші джерела тепла.

Незначна варіабельність показників споживання природного газу була характерна для більшості регіонів. Водночас, значні коливання (великі варіації) були зафіксовані у чотирьох областях: Івано-Франківській (де було зареєстровано найвищий рівень варіацій), а також на Рівненщині, Луганщині, та Тернопільщині.

На рис. 4.7 зображено питоме використання ЕЕ на опалення одиниці житла в регіонах впродовж 2017–2021 рр. Переважна більшість адміністративно-територіальних одиниць протягом усього п'ятирічного періоду демонструвала стабільно низький рівень споживання електричної енергії для потреб опалення.

Найнижче споживання та мінімальні зміни у показниках були зафіксовані на Чернігівщині, Закарпатті та Тернопільщині, що може свідчити про високий рівень енергетичної ефективності або низьке проникнення електричних систем опалення.

У чотирьох регіонах спостерігалася неоднорідна динаміка споживання з коливанням між низьким та середнім рівнями:

- Миколаївська область: Характеризувалася низьким рівнем у 2017 та 2020 роках, тоді як в інші роки фіксувався середній рівень.
- Полтавська та Чернівецька області: Середній рівень спостерігався лише епізодично — у 2018 році.
- Рівненська область: Середній рівень був зафіксований двічі — у 2018 та 2021 роках.

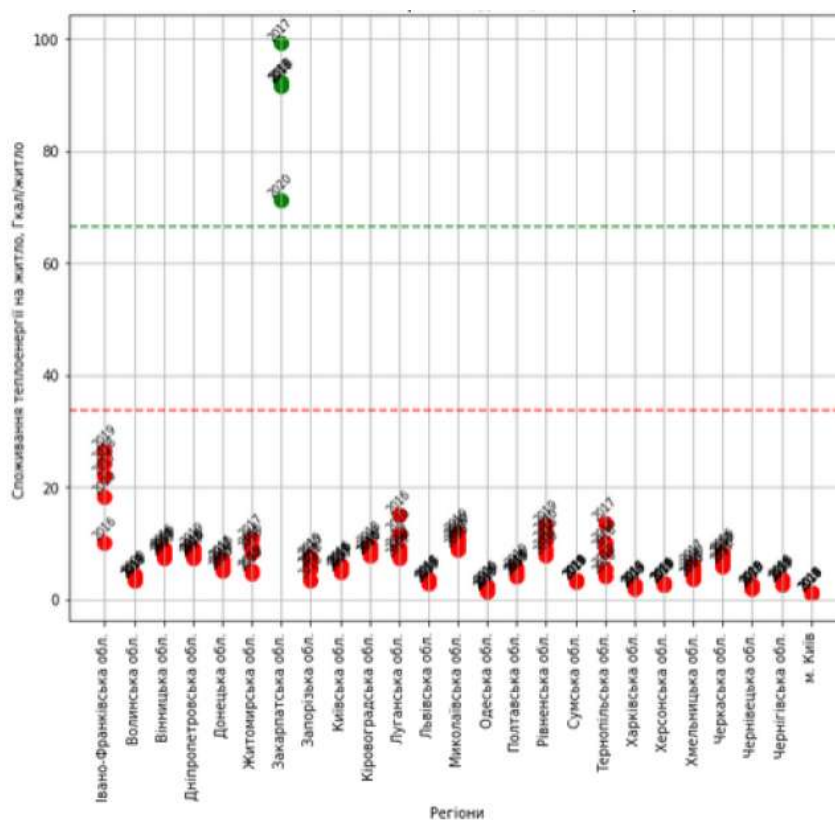


Рисунок 4.6 – Динаміка питомого споживання теплової енергії для опалення житлового фонду в регіонах (2017–2021 рр.).

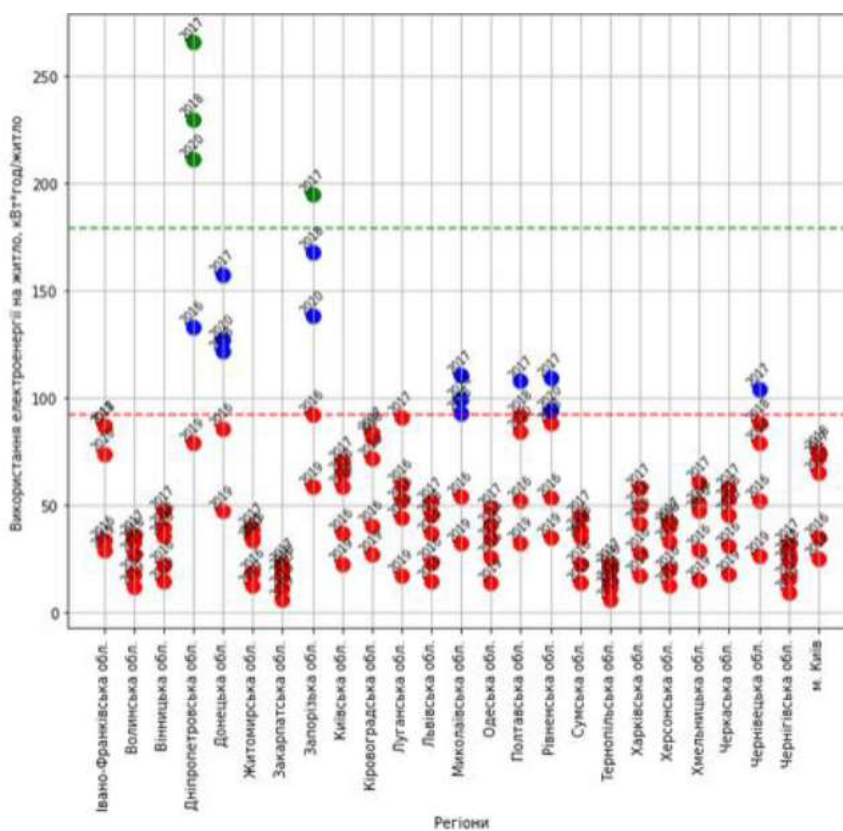


Рисунок 4.7 – Динаміка питомого використання електроенергії для опалення житлового фонду в регіонах (2017–2021 рр.)

Окремі регіони демонструють високу інтенсивність споживання електроенергії на опалення:

- Донецька область утримувала споживання електроенергії переважно на середньому рівні, з падінням до низького рівня лише у 2017 та 2020 роках.
- Два регіони продемонстрували найбільш динамічне та інтенсивне споживання:
  - Запорізька область характеризується високою варіативністю (від низького рівня у 2017 та 2020 рр. до високого у 2018 р.). Така нестабільність може бути індикатором швидких структурних змін або перехідного стану між різними кластерами енергоспоживання.
  - Дніпропетровська область має найбільше споживання електроенергії серед усіх регіонів, фіксуючи максимальні значення протягом трьох років досліджуваного періоду (2018, 2019 та 2021 рр.).

Порівняльний розподіл споживання вугілля для опалення житла в регіонах України відображено на рисунку 4.8.

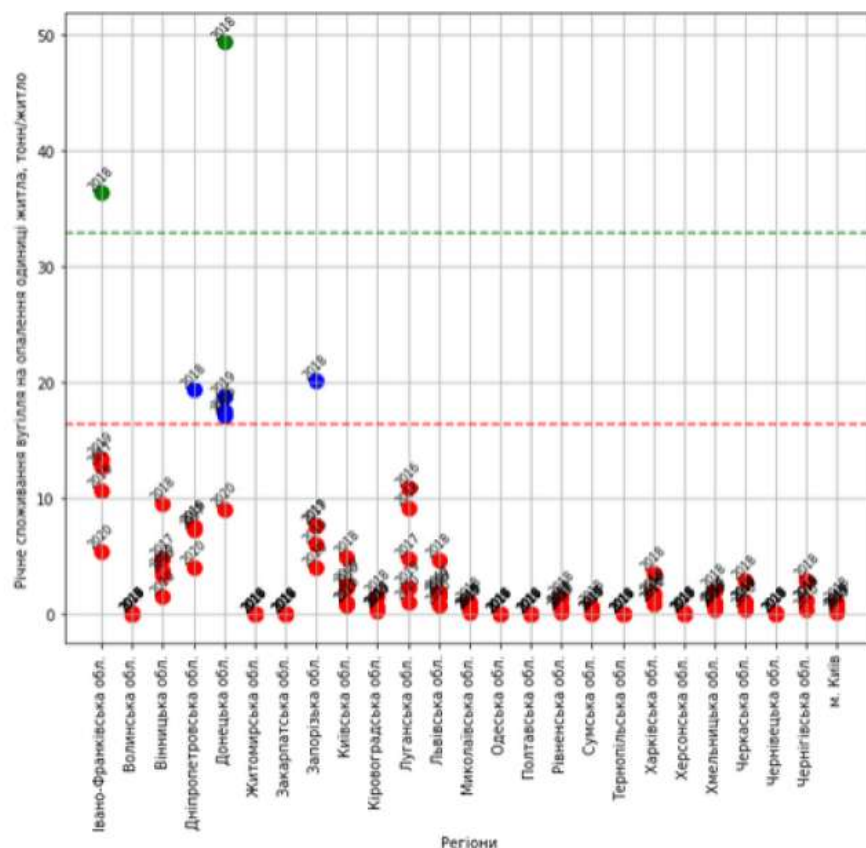


Рисунок 4.8 – Регіональні відмінності у використанні вугілля на опалення одиниці житла (2017–2021 рр.)

Використання вугілля для потреб опалення у більшості регіонів України залишається на низькій позначці. Винятками є області, чия інфраструктура чи історія тісно пов'язані з вугільною галуззю, де аналіз даних виявляє значну динаміку:

2019 рік став періодом значного зростання попиту на вугілля в опалювальній сфері для низки ключових регіонів. Зокрема:

- Донецька область: Відбулося критичне зростання споживання від середнього до високого рівня у 2019 році, що, однак, було нівельовано зниженням до низького показника вже у 2021 році.
- Дніпропетровська та Запорізька області: У 2019 році зафіксовано перехід від низького до середнього обсягу використання.
- Івано-Франківська область: Тут відзначено найбільш різкий приріст у 2019 році, коли споживання стрибнуло з низького рівня до високого.

Варто зазначити, що поза межами цього пікового 2019 року, в усіх перелічених регіонах, крім Донецької, спостерігалися стабільно низькі показники споживання.

#### **4.3. Оцінка впливу соціально-економічного потенціалу та демографічного навантаження на енергоефективність регіону**

Енергоефективність регіонального комплексу є функцією не лише технологічних, але й соціально-економічних чинників, які визначають платоспроможність населення, його здатність до модернізації житла та загальну економічну активність.

Енергоефективність регіону неможлива без врахування платоспроможності населення та загальної економічної активності. Отже, дослідимо ключові фінансові та макроекономічні індикатори.

Динаміка та регіональна диференціація середньомісячної номінальної заробітної плати штатних працівників за 2017–2021 рр. представлена на рисунку 4.9.

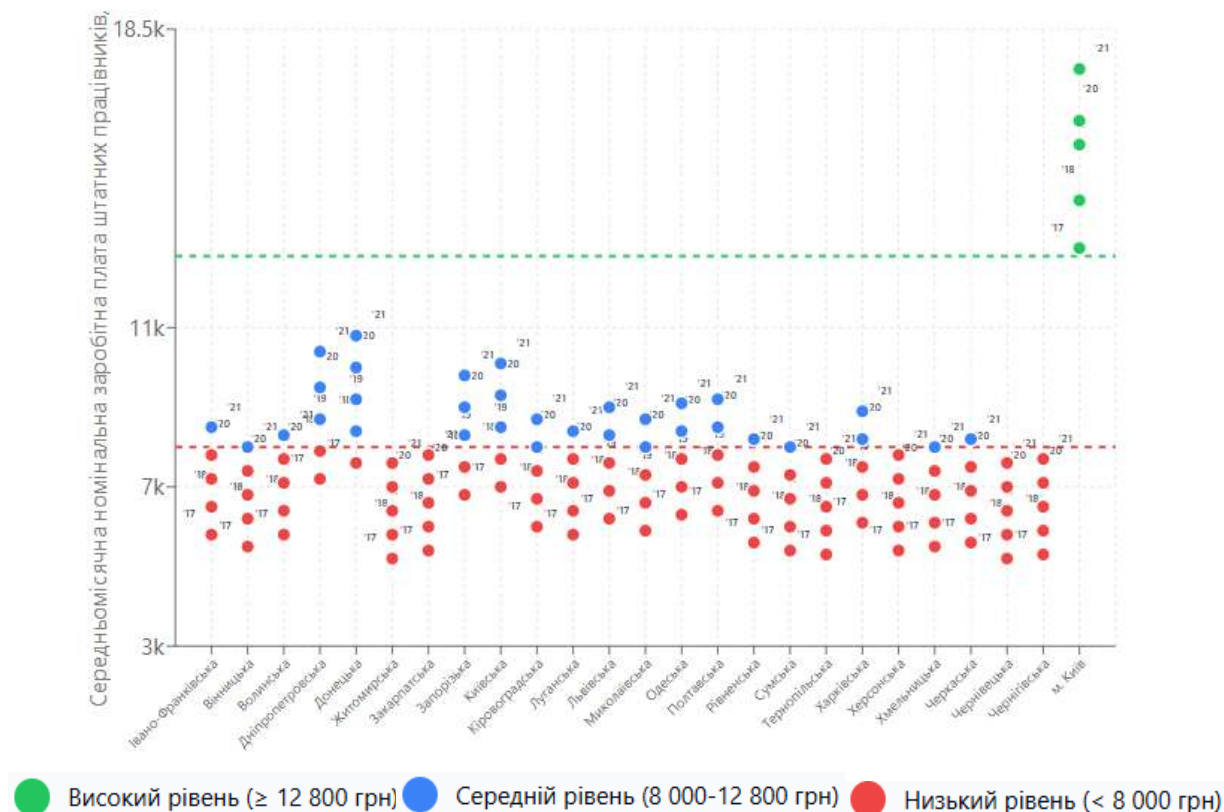


Рисунок 4.9 – Динаміка та регіональна диференціація середньомісячної заробітної плати штатних працівників (2017–2021 рр.)

Основний висновок п'ятирічного аналізу свідчить про стійку позитивну динаміку: протягом усього досліджуваного періоду в усіх регіонах України відзначено безперервне зростання середньомісячної заробітної плати.

Лідируючі позиції за рівнем заробітної плати зайняли м. Київ та Донецька область, які досягли найвищих показників.

- Київ зафіксував високий рівень заробітної плати ще з 2019 року.
- Донецька область увійшла до цієї групи дещо пізніше, забезпечивши високий рівень оплати праці у 2021 році.
- Таким чином, найвищий рівень середньомісячної заробітної плати зосереджений у Донецькій області та столиці.

Аналіз регіонального розподілу зафіксував, що більшість областей вийшли на середній рівень заробітної плати у 2020 році. Однак,

спостерігається виражена диференціація у часі досягнення цього рівня. Так, найпізніший перехід (2021 рік) відбувся у Чернівецькому регіоні.

Аналіз еволюції макроекономічних показників регіонів за показником ВРП у поточних цінах (2017–2021 рр.) наведено на рисунку 4.10.

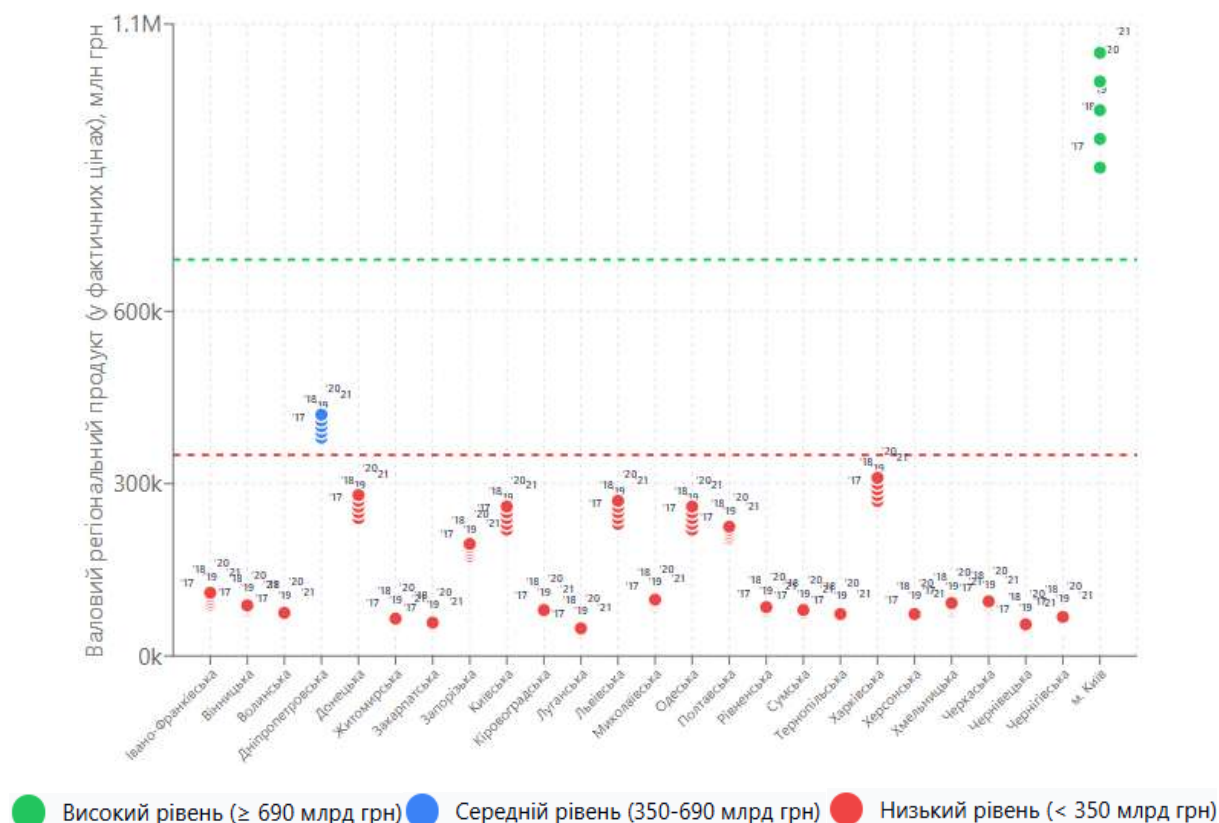


Рисунок 4.10 – Динаміка та регіональна диференціація валового регіонального продукту (ВРП) у номінальному вимірі (2017–2021 рр.)

Основною тенденцією аналізу ВРП на душу населення протягом п'ятирічного періоду було домінування низького рівня в абсолютній більшості регіонів.

Винятком із цієї загальної картини стали дві адміністративно-територіальні одиниці, що продемонстрували значно вищі показники:

- Дніпропетровська область: Зафіксовано зростання показника з низького рівня до середнього у 2019 році.
- Місто Київ: Столиця зберігає статус регіону з найбільшим ВРП серед усіх адміністративних одиниць. У Києві рівень ВРП змінився із середнього (у 2017 році) на високий вже наступного року, у 2018 році.

Просторовий розподіл економічного розвитку, оцінений на основі показника ВРП на душу населення, детально проілюстрований на Рисунку 4.11. Ця візуалізація наочно демонструє згадану вище регіональну асиметрію та підтверджує домінування низьких значень із чітко окресленими центрами високого економічного рівня.

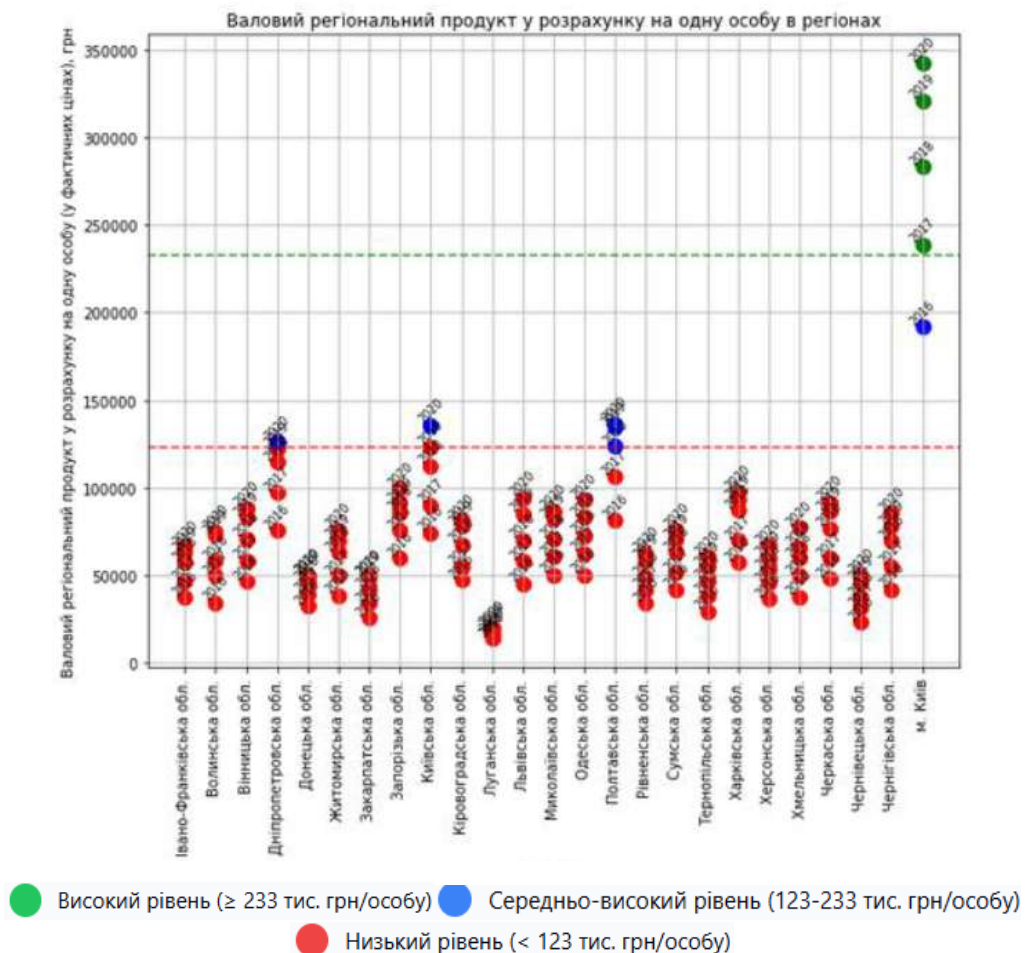


Рисунок 4.11 – Рівень економічного розвитку регіонів за показником ВРП на душу населення (2017–2021 рр.)

Місто Київ підтверджує статус безумовного лідера за економічною активністю, демонструючи найбільший показник ВРП/особу. У столиці цей індикатор перейшов із середнього рівня (у 2017 році) на високий вже з 2018 року, зберігаючи лідерство впродовж усього подальшого періоду.

Три області продемонстрували позитивну динаміку, здійснивши перехід рівня ВРП/особу з низького на середній, але з різною швидкістю:

- Полтавська область: найраніше — у 2019 році;
- Дніпропетровська область: перехід зафіксовано у 2020 році;
- Київська область: досягла середнього рівня найпізніше — у 2021 році.

Загальна динаміка віддзеркалює тренд середньої заробітної плати, демонструючи стійке зростання по країні. Однак, найнижчі значення цього економічного показника стабільно фіксуються в Луганській області.

Аналіз абсолютної чисельності населення та її динаміки в регіональному розрізі є фундаментальним етапом інтегрального оцінювання енергоефективності. Чисельність населення прямо впливає на питомі показники споживання (на душу населення), а також визначає загальний потенційний попит на енергетичні ресурси та послуги (опалення, електроенергія, транспорт). На рисунку 4.12 зображено розподіл чисельності наявного населення в областях України протягом 2017–2021 рр.

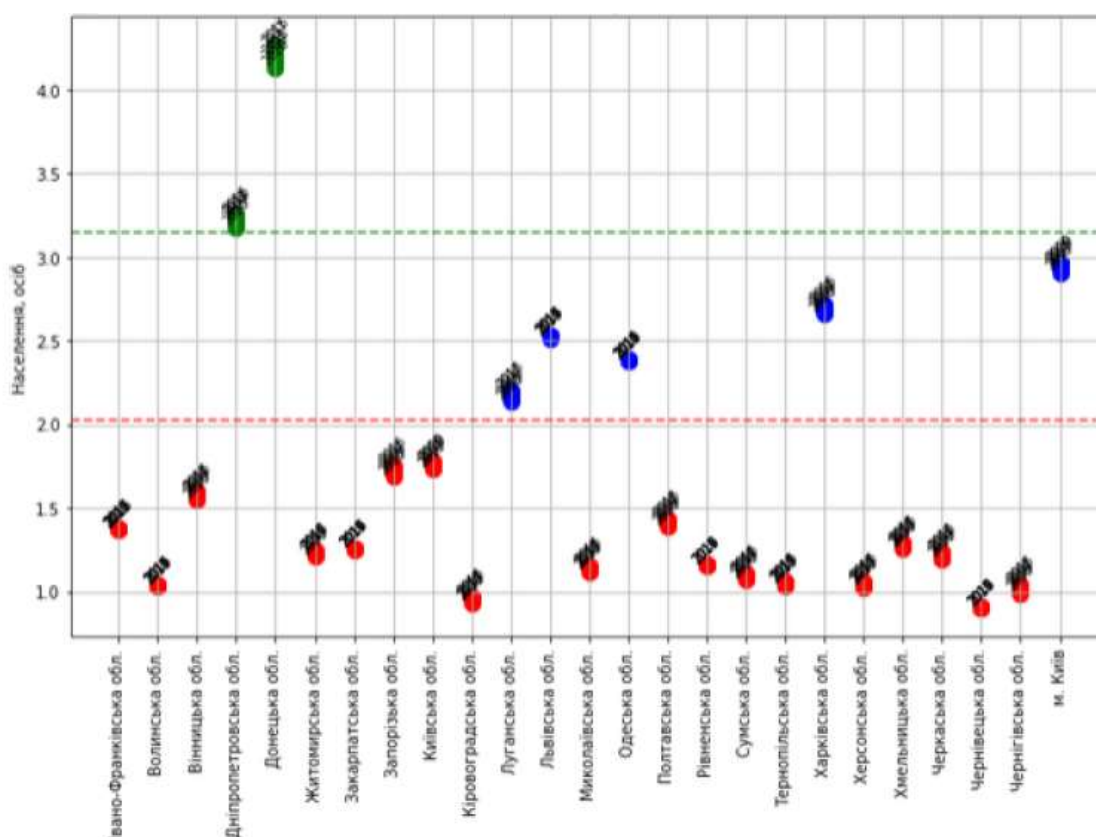


Рисунок 4.12 – Динаміка чисельності населення в регіонах України (2017–2021 рр.)

Аналіз графіка дозволяє розділити регіони на кілька груп за абсолютними показниками та динамікою:

### 1. Група високого навантаження (понад 3 млн осіб)

Ця група включає найбільші економічні та адміністративні центри, які створюють максимальне абсолютне навантаження на регіональний енергетичний комплекс.

- Абсолютні лідери: Дніпропетровська область стабільно має найбільшу чисельність населення (понад 3,2 млн осіб) протягом усього періоду.

- Регіони з критично високою щільністю: м. Київ також входить до цієї групи (понад 2,8 млн осіб), демонструючи високу щільність населення, що, з огляду на його малу площу, створює виняткове навантаження на енергетичну інфраструктуру.

- Значні центри: Донецька та Львівська області також демонструють високі показники, що перевищують середній регіональний рівень.

### 2. Група середнього рівня (2,0 – 3,2 млн осіб)

- Стабільні середні регіони: До цієї групи входять такі великі області, як Одеська та Харківська, чия чисельність населення стабільно перевищує позначку в 2,5 млн осіб, але не досягає рівня лідерів.

- Динаміка: У більшості регіонів цієї групи спостерігається незначна негативна динаміка протягом досліджуваного періоду (позначки 2021 року, як правило, нижчі за 2017 рік), що свідчить про загальнонаціональні демографічні тенденції.

### 3. Група низького навантаження (менше 2,0 млн осіб)

Переважає більшість областей України належать до цієї групи. У цих регіонах чисельність населення переважно коливається в діапазоні 1,0 – 1,8 млн осіб.

- Найменші: Найменше навантаження на енергосистему за чисельністю населення припадає на такі області, як Чернівецька,

Тернопільська та Сумська, де населення знаходиться близько до позначки 1,0 млн осіб.

- Динаміка в низьконавантажених регіонах: В усіх регіонах цієї групи спостерігається чітка негативна тенденція протягом 2017–2021 рр. (наприклад, Івано-Франківська, Вінницька, Волинська, Хмельницька області), що є важливим фактором для планування регіональних енергетичних стратегій та модернізації мереж.

Графік підтверджує, що в більшості регіонів України протягом 2017–2021 рр. спостерігається негативна демографічна динаміка. Це означає, що зростання питомих показників енергоефективності на душу населення може бути частково штучним та обумовленим зменшенням знаменника (кількості населення), а не виключно технологічною модернізацією. Цей фактор слід обов'язково враховувати при інтегральному оцінюванні.

#### **Висновки до розділу 4**

За результатами інтервального оцінювання ключових індикаторів енергоефективності та аналізу соціально-економічних чинників у регіональному розрізі за період 2017–2021 рр. встановлено виражену регіональну диференціацію та низку системних тенденцій, які є визначальними для формування стратегій енергетичного переходу та термомодернізації.

Щодо структурних та кліматичних індикаторів спостерігається:

1. Тенденція до децентралізації теплозабезпечення: Встановлено чіткий вектор до індивідуалізації опалення, що підтверджується зниженням частки централізованого опалення (СО) та відповідним зростанням індивідуального (ІО) у ключових регіонах (зокрема, Миколаївська та Сумська області). Це свідчить про посилення автономності домогосподарств, але також вимагає уваги до стандартизації та ефективності індивідуальних систем.

2. Регіональна газова залежність: Виявлено критично високу залежність від централізованого газопостачання у восьми промислово розвинених та густонаселених областях. Ці регіони мають бути пріоритетними об'єктами для впровадження програм заміщення природного газу альтернативними джерелами енергії.

3. Вплив клімату: Підтверджено значну кліматичну диференціацію: Сумська та Чернігівська області характеризуються найнижчими середніми температурами опалювального періоду, що об'єктивно зумовлює найбільші потреби у тепловій енергії та визначає їх як регіони першочергової потреби у масштабній термомодернізації житлового фонду.

Щодо структури споживання енергоресурсів спостерігається:

1. Позитивна динаміка газоспоживання: Загальна тенденція до зниження питомого споживання природного газу на опалення одиниці житла у більшості регіонів, особливо помітна з 2020 року, свідчить про результативність впроваджених заходів з енергоефективності, переходу на некомерційні види палива або впливу кліматичного чинника (тепліші опалювальні сезони). Найбільш виражене зниження зафіксовано у Черкаській області.

2. Волатильність електроспоживання: Дніпропетровська та Запорізька області демонструють найбільш динамічне та високе питоми споживання електроенергії на опалення, що вказує на суттєву роль електричного опалення або високого рівня електрифікації побуту. Нестабільність цього показника вимагає поглибленого вивчення.

3. Збереження ролі твердого палива: Різкі стрибки споживання вугілля у 2019 році у Донецькій, Дніпропетровській, Запорізькій та Івано-Франківській областях свідчать про збереження його значущості у паливному балансі житлового сектору, що, ймовірно, пов'язано з локальними економічними та інфраструктурними особливостями.

Щодо оцінки соціально-економічного та демографічного потенціалу спостерігається:

1. Зростання платоспроможності: спостерігається стійка позитивна динаміка зростання середньомісячної номінальної заробітної плати в усіх регіонах, що формує фінансову передумову для підвищення інвестиційної активності населення у сфері енергоефективності житла.

2. Економічна концентрація: аналіз валового регіонального продукту (ВРП) підтверджує значну регіональну асиметрію економічного розвитку. м. Київ виступає безумовним лідером, що має найбільший економічний потенціал для фінансування програм модернізації.

3. Вплив демографічної динаміки: встановлена загальнонаціональна негативна тенденція до зменшення чисельності населення. Цей фактор є критичним для коректного інтегрального оцінювання, оскільки він може штучно покращувати питомі показники енергоефективності на душу населення, не відображаючи реального технологічного прогресу.

Загалом, результати оцінювання підтверджують, що підвищення енергоефективності в Україні є багатофакторним процесом. Успішна реалізація регіональних енергетичних стратегій вимагає диференційованого підходу, який поєднує стимули для заміщення газу в залежних регіонах, цільову термомодернізацію в найхолодніших кліматичних зонах та забезпечення стабільності енергоспоживання у регіонах з високою електричною волатильністю. Зростаючий соціально-економічний потенціал населення створює сприятливі умови для реалізації цих заходів.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконаного дослідження досягнуто поставленої мети — розроблено та апробовано науково-методичний підхід до інтегрального оцінювання рівня енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України на основі методів багатовимірної статистики. Комплексне вирішення поставлених завдань дозволило сформулювати наступні ключові висновки:

1. Проведено структурно-функціональний аналіз ПЕК України та обґрунтовано, що висока енергетична залежність та критична енергоємність економіки вимагають переходу від екстенсивного до інтенсивного шляху розвитку, що базується на раціональному використанні енергії. Доведено, що традиційний моніторинг окремих показників є недостатнім, що підтверджує необхідність впровадження інтегрального оцінювання енергоефективності як ключового елемента забезпечення енергетичної безпеки регіонів.

2. Систематизовано міжнародні підходи до оцінювання енергоефективності (зокрема, методики ODYSSEE та MEA з використанням індексу ODEX та декомпозиційного аналізу LMDI I), які послугували основою для розроблення регіональної системи оцінки. Обґрунтовано доцільність застосування методів багатовимірної статистики та машинного навчання, а саме методу головних компонент (PCA), для типізації та зниження розмірності даних у високорозмірній системі індикаторів, а також таксонометричного індикатора для агрегування кінцевого результату.

3. На основі експертного аналізу розроблено систему з 11 ключових індикаторів енергетичної безпеки та ефективності, класифікованих за блоками (надійності, виробництва, споживання та екологічним), та встановлено їхні порогові значення для діагностики кризових станів. Застосування методу PCA до матриці індикаторів дозволило звести вихідну інформацію до трьох латентних факторів, які спільно пояснюють 84,6% загальної дисперсії.

4. Розрахунок таксонометричного індикатора ( $T_j$ ) на основі евклідової відстані до еталонного стану забезпечив об'єктивне ранжування територіальних громад за рівнем енергетичної безпеки. Ідентифіковано

громади-лідери (наприклад, Новомиргородська та Новоархангельська ТГ) та громади-аутсайтери (Петрівська, Заваллівська та Бобринецька ТГ), які демонструють критично низький потенціал і потребують першочергових заходів.

5. Виявлено виражену регіональну диференціацію та стійку тенденцію до децентралізації теплозабезпечення та зниження питомого споживання природного газу, починаючи з 2020 року. Водночас, підтверджено критичну газову залежність промислових регіонів та високу волатильність електроспоживання у Дніпропетровській та Запорізькій областях. Встановлено, що загальнонаціональна негативна демографічна динаміка може штучно покращувати питомі показники енергоефективності на душу населення, що вимагає врахування цього чинника при плануванні.

Розроблений інтегральний інструментарій має високу практичну цінність, оскільки надає органам державної влади та місцевого самоврядування емпіричну основу для пріоритезації інвестицій у модернізацію енергетичної інфраструктури, спрямованих на громади з найбільшою відстанню до еталона, а також розроблення диференційованих регіональних програм енергетичного менеджменту та заміщення газу, орієнтованих на усунення впливу найбільш значущого виробничо-енергетичного фактора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність: Закон України від 17.07.2020 № 741-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/741-20#Text> (Дата звернення: 29.11.2025).
2. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.1994 № 74/94-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80#Text> (Дата звернення: 29.11.2025).
3. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (Дата звернення: 29.11.2025).
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (Дата звернення: 29.11.2025).
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text> (Дата звернення: 29.11.2025).
6. Суходоля О. М. Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2023. 248 с. URL: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-12/ad\\_mono\\_sukhodolia\\_do\\_druku\\_na\\_site\\_02\\_01\\_2024.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-12/ad_mono_sukhodolia_do_druku_na_site_02_01_2024.pdf) (Дата звернення: 29.11.2025).
7. Саєнко В. М. Методичні підходи до оцінювання енергетичної безпеки регіонів України. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2018. № 15. С. 136–142.
8. Ковальчук В. М., Ковальчук Н. К. Енергоефективність в економіці України: регіональні особливості та політика стимулювання. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 2 (41). С. 110–118.

9. Ляшенко О. М. Факторний аналіз у статистичному дослідженні соціально-економічних процесів. Київ : КНЕУ, 2019. 165 с.
10. Петренко В. Р. Системний підхід до управління енергоефективністю регіонального розвитку. *Інноваційна економіка*. 2021. № 1-2. С. 132–137. URL: <https://inneco.org/index.php/innecoua/article/download/716/789/1508> (Дата звернення: 29.11.2025).
11. Energy Efficiency – Energy System. *International Energy Agency (IEA)*. URL: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency> (Дата звернення: 29.11.2025).
12. Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency by 2030. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, 2025. URL: <https://www.irena.org/> (Дата звернення: 29.11.2025).
13. Xiao X., Li X., Liu Y. Measuring and improving regional energy security: A methodological framework based on both quantitative and qualitative analysis. *Polytechnic University of Hong Kong*, 2021. URL: [https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/94573/1/Xiao\\_Measuring\\_Improving\\_Regional.pdf](https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/94573/1/Xiao_Measuring_Improving_Regional.pdf) (Дата звернення: 29.11.2025).
14. European Commission. Energy Efficiency Directive 2023/1791 (EED). Official Journal of the European Union. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1791/oj> (Дата звернення: 29.11.2025).
15. Kryeziu A., Shabani I., Bardiqi P. Approaches to a New Regional Energy Security Model in the Perspective of the European Transition to Green Energy. *Sustainability (MDPI)*. 2024. Vol. 12, Issue 3, 61. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7099/12/3/61> (Дата звернення: 29.11.2025).
16. Energy Efficiency – Energy System. *International Energy Agency (IEA)*. URL: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency> (Дата звернення: 29.11.2025).

17. Delivering on the UAE Consensus: Tracking progress toward tripling renewable energy capacity and doubling energy efficiency by 2030. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, 2025. URL: <https://www.irena.org/> (Дата звернення: 29.11.2025).
18. Xiao X., Li X., Liu Y. Measuring and improving regional energy security: A methodological framework based on both quantitative and qualitative analysis. *Polytechnic University of Hong Kong*, 2021. URL: [https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/94573/1/Xiao\\_Measuring\\_Improving\\_Regional.pdf](https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/94573/1/Xiao_Measuring_Improving_Regional.pdf) (Дата звернення: 29.11.2025).
19. European Commission. Energy Efficiency Directive 2023/1791 (EED). Official Journal of the European Union. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1791/oj> (Дата звернення: 29.11.2025).
20. Kryeziu A., Shabani I., Bardiqi P. Approaches to a New Regional Energy Security Model in the Perspective of the European Transition to Green Energy. *Sustainability (MDPI)*. 2024. Vol. 12, Issue 3, 61. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7099/12/3/61> (Дата звернення: 29.11.2025).
21. Баланс паливно-енергетичних ресурсів України. *Державна служба статистики України (Держстат)*. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (Дата звернення: 29.11.2025).
22. Енергетична ефективність. *Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності)*. URL: <https://saee.gov.ua/uk/regulations> (Дата звернення: 29.11.2025).
23. Stern, N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press, 2007. URL: [http://mudam.lu/fileadmin/editor/MUDAM\\_docs/PDF/stern\\_review\\_full\\_report.pdf](http://mudam.lu/fileadmin/editor/MUDAM_docs/PDF/stern_review_full_report.pdf).
24. Jamasb, T., Nepal, R., Toman, M. Energy security and sustainability in the electricity sector: A systematic review and future research agenda. *Renewable*

*and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 188. Article 113797. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113797>

25. Cherp, A., Jewell, J. The concept of energy security: beyond the four As. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39, Issue 9. P. 5350–5360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.001>

26. ODYSSEE-MURE Project. Monitoring energy efficiency policy and evaluating its impacts in Europe. *Enerdata*. URL: <https://www.odyssee-mure.eu/>

27. Shylo, A. I., Semenov, A. I. Modeling the energy efficiency of the regional economy based on multivariate statistical analysis. *Applied Economics*. 2022. Vol. 15, Issue 2. P. 155–164. URL: <https://apliecono.com/index.php/ae/article/view/101> (Стаття з прикладним застосуванням багатовимірного аналізу для моделювання енергоефективності регіональної економіки).

28. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 74 с. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>.

29. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (Дата звернення: 22.11.2025).

## ДОДАТКИ

## Додаток А. ОХОРОНА ПРАЦІ

### А.1. Загальні положення та нормативно-правова база

Розділ охорони праці є невід'ємною частиною кваліфікаційної роботи та має на меті обґрунтування безпечних умов праці для персоналу, який виконує аналітичну діяльність, пов'язану з оцінюванням показників енергоефективності. Усі заходи та розрахунки розроблено відповідно до чинного законодавства та нормативних документів України, зокрема:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Кодекс законів про працю України (КЗпП);
- Державні будівельні норми (ДБН) В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди»;
- ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування»;
- ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) ЕОМ».

Метою є мінімізація впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ), забезпечення пожежної безпеки об'єкта та створення оптимального мікроклімату для високої продуктивності праці.

### А.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ)

У процесі аналітичної роботи в адміністративно-офісних умовах існують наступні потенційні НШВФ, які необхідно контролювати та усувати (див. табл.А.1).

Таблиця А.1 – Класифікація потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Група НШВФ	Фактор	Приклади впливу	Заходи запобігання та захисту
Фізичні	Мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря)	Перегрівання або переохолодження організму, зниження концентрації уваги.	Впровадження ефективних систем опалення та вентиляції; автоматичний контроль параметрів повітря.

## Продовження табл.А.1.

Група НШВФ	Фактор	Приклади впливу	Заходи запобігання та захисту
	Освітлення (недостатнє, надмірне, пульсація)	Перенапруження зору, головний біль, підвищення втоми.	Забезпечення нормованого рівня освітленості (згідно з ДБН В.2.5-28:2018), використання світильників із захистом від пульсації.
	Шум та вібрація (від офісної техніки, систем вентиляції)	Подразнення нервової системи, зниження слуху (при високих рівнях).	Розміщення джерел шуму (серверні, потужні принтери) в окремих приміщеннях; використання шумопоглинальних матеріалів.
Ергономічні	Робоча поза	Хвороби опорно-рухового апарату, втома м'язів.	Регулювання висоти столу та крісла, використання ергономічних аксесуарів (підставки для ніг, зап'ясть).
	Напруженість зору (робота з ВДТ)	Синдром сухого ока, погіршення гостроти зору.	Регламентация часу безперервної роботи (не більше 4 годин на день), обов'язкові перерви (кожні 45-60 хвилин).
Хімічні та пожежна безпека	Пожежа (коротке замикання, перегрів обладнання)	Термічні опіки, отруєння продуктами горіння.	Системи автоматичної пожежної сигналізації, вогнегасники, розрахунок протипожежного водопостачання.
Електробезпека	Ураження електричним струмом	Вплив на нервову та серцево-судинну системи.	Заземлення, захисне занулення, використання захисних пристроїв відключення (ПЗВ).

### **А.3. Розрахунок необхідного обсягу води для зовнішнього пожежогасіння**

Для забезпечення належного рівня пожежної безпеки будівлі, де розміщується аналітичний відділ, необхідно розрахувати нормативну витрату та обсяг води для зовнішнього пожежогасіння.

#### **А.3.1. Вихідні дані (згідно з ДБН В.2.5-74:2013):**

1. Об'єкт: Типова **адміністративна будівля** (офісний простір).
2. Ступінь вогнестійкості: **II** (характерно для сучасних будівель).
3. Геометричний об'єм будівлі:  $V = 10000 \text{ м}^3$ .

#### **А.3.2. Нормативні показники:**

1. Згідно з Таблицею 2 ДБН В.2.5-74:2013, для адміністративних будівель II ступеня вогнестійкості об'ємом до  $25000 \text{ м}^3$  нормативна витрата води на зовнішнє пожежогасіння становить:

$$L_{\text{норм}} = 10 \text{ л/с}$$

2. Тривалість гасіння пожежі для об'єктів адміністративно-громадського призначення приймається:

$$T = 3 \text{ години} = 10800 \text{ с.}$$

#### **А.3.3. Розрахунок необхідного обсягу води ( $W_{\text{заг}}$ ):**

Необхідний об'єм води (у кубічних метрах) визначається за формулою:

$$W_{\text{заг}} = \frac{L_{\text{норм}} \cdot T}{1000}$$

$$W_{\text{заг}} = \frac{10 \text{ л/с} \cdot 10800 \text{ с}}{1000 \frac{\text{л}}{\text{м}^3}} = 108 \text{ м}^3$$

*Висновок:* Для забезпечення зовнішнього пожежогасіння об'єкта необхідно забезпечити мінімальний об'єм води  $108 \text{ м}^3$  із зовнішніх джерел (пожежні гідранти, резервуари).

#### **А.4. Розрахунок необхідного повітрообміну в адміністративному приміщенні**

Для підтримання оптимального мікроклімату та видалення забруднень (зокрема, вуглекислого газу та тепловиділень від оргтехніки) необхідно розрахувати мінімально необхідний повітрообмін у приміщенні.

##### **А.4.1. Вихідні дані (згідно з ДБН В.2.5-67:):**

1. Тип приміщення: адміністративний офіс (аналітичний відділ).
2. Кількість постійних робочих місць:  $N = 10$  осіб.
3. Площа приміщення:  $S = 60 \text{ м}^2$ .
4. Висота приміщення:  $H = 3 \text{ м}$ .
5. Об'єм приміщення:  $V_{\text{пр}} = S \cdot H = 60 \text{ м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 180 \text{ м}^3$ .

##### **А.4.2. Розрахунок за кількістю людей:**

Згідно з ДБН В.2.5-67:2013, мінімальна норма подачі зовнішнього повітря становить  $30 \text{ м}^3/\text{год}$  на одну людину (для офісів без природного провітрювання) або  $20 \text{ м}^3/\text{год}$  (для офісів з природним провітрюванням). Прийемо більш жорстку норму для забезпечення комфорту:

$$L_{\text{ос}} = N \cdot L_{\text{норм,ос}} = 10 \text{ осіб} \cdot 30 \frac{\text{м}^3}{\text{год} \cdot \text{ос}} = 300 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

##### **А.4.3. Розрахунок за кратністю повітрообміну:**

Мінімальна кратність повітрообміну ( $K$ , обмін/год) для адміністративних приміщень зазвичай приймається  $K = 2$  обмін/год.

$$L_K = V_{\text{пр}} \cdot K = 180 \text{ м}^3 \cdot 2 \frac{\text{обмін}}{\text{год}} = 360 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

##### **А.4.4. Визначення необхідного повітрообміну:**

Необхідний повітрообмін ( $L_{\text{потр}}$ ) приймається за найбільшим із отриманих значень ( $L_{\text{ос}}$  або  $L_K$ ):

$$L_{\text{потр}} = \max(L_{\text{ос}}; L_K) = \max\left(300 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}; 360 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}\right) = 360 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

*Висновок:* Для забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов в адміністративному приміщенні об'ємом  $180 \text{ м}^3$  із 10 працівниками, система

вентиляції повинна забезпечувати подачу свіжого повітря на рівні не менше 360 м<sup>3</sup>/год.

## **А.5. Забезпечення електробезпеки та охорони навколишнього середовища**

### *А.5.1. Електробезпека*

З метою запобігання ураженню електричним струмом необхідно вжити організаційних та технічних заходів.

#### ***Технічні заходи:***

1. Заземлення та занулення: Обов'язкове заземлення корпусів усього металевого електрообладнання, особливо оргтехніки та серверного обладнання, що працює в мережі з напругою понад 42 В змінного струму.

2. Захисне відключення: Використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ) з номінальним струмом спрацювання не більше 30 мА для підвищення безпеки при прямому чи непрямому дотику.

3. Використання низької напруги: Застосування понижуючих трансформаторів для живлення переносних світильників або інструментів.

4. Справність ізоляції: Регулярний візуальний та інструментальний контроль стану ізоляції електропроводки, кабелів та гнучких шнурів.

#### *А.5.1.1. Розрахунок опору захисного заземлення*

Основною вимогою до захисного заземлення електроустановок напругою до 1 кВ є забезпечення опору заземлювального пристрою ( $R_{заг}$ ) не вище нормативного значення, яке, як правило, становить 4 Ом.

Проведемо розрахунок опору для системи, що складається з вертикальних стрижневих електродів:

Вихідні дані:

- Нормативний опір:  $R_{норм} \leq 4$  Ом;
- Питомий опір ґрунту (суглинок):  $\rho = 50$  Ом·м;
- Довжина вертикального стрижня:  $L = 5$  м;
- Діаметр стрижня:  $d = 0.016$  м;
- Кількість стрижнів (прийнято для розрахунку):  $n = 5$  шт;

- Коефіцієнт використання (залежить від кількості та розташування, приймаємо):  $\eta = 0.65$ .

Розрахунок опору одиничного вертикального електрода ( $R_1$ ):

Для стрижневого електрода, заглибленого у ґрунт, опір визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \left( \ln \frac{4L}{d} \right)$$

Підставляємо значення:

$$R_1 = \frac{50 \text{ Ом} \cdot \text{м}}{2\pi \cdot 5 \text{ м}} \cdot \left( \ln \frac{4 \cdot 5 \text{ м}}{0.016 \text{ м}} \right) = 1.59 \cdot \ln(1250) \approx 1.59 \cdot 7.13 \approx 11.33 \text{ Ом}$$

Розрахунок опору групового заземлювача ( $R_{заг}$ ):

Опір групового заземлювача, що складається з  $n$  електродів, розраховується з урахуванням коефіцієнта використання  $\eta$ :

$$R_{заг} = \frac{R_1}{n \cdot \eta}$$

Підставляємо значення:

$$R_{заг} = \frac{11.33 \text{ Ом}}{5 \cdot 0.65} = \frac{11.33 \text{ Ом}}{3.25} \approx 3.48 \text{ Ом}$$

*Висновок:* Розрахований опір захисного заземлення становить  $R_{заг} = 3.48$  Ом, що є меншим за нормативне значення  $R_{норм} \leq 4$  Ом. Таким чином, прийнята конструкція заземлювального пристрою забезпечує необхідний рівень електробезпеки.

#### **Організаційні заходи:**

1. Регулярний інструктаж персоналу з електробезпеки (первинний, повторний, позаплановий).

2. Призначення наказом відповідальних осіб за електробезпеку.

#### *А.5.2. Охорона навколишнього середовища*

Охорона навколишнього середовища є інтегральною частиною даної кваліфікаційної роботи. Оскільки робота присвячена оцінюванню

енергоефективності, всі пропоновані заходи мають прямий позитивний вплив на довкілля.

1. **Зменшення викидів:** Підвищення енергоефективності житлового сектору та зниження споживання природного газу прямо призводить до зменшення викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>2</sub> в атмосферу, сприяючи досягненню цілей Паризької угоди.

2. **Раціональне використання ресурсів:** Впровадження індивідуального обліку та термомодернізації дозволяє знизити непродуктивні втрати теплової енергії та палива.

3. **Утилізація відходів:** Забезпечення роздільного збору та належної утилізації відпрацьованих елементів живлення (батареєнок), офісної техніки та електронного обладнання з метою запобігання забрудненню ґрунтів важкими металами.

Ефективне управління охороною праці та навколишнім середовищем є необхідною умовою для сталого та безпечного функціонування будь-якого економічного суб'єкта.