

Міжнародні економічні відносини

УДК 620.92:338.242.2:339.92(477:4-67ЄС)

Музуров Дмитро Андрійович

*аспірант кафедри міжнародних економічних відносин та логістики
Навчально-наукового інституту «Каразінський інститут міжнародних
відносин та туристичного бізнесу»*

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Muzurov Dmytro

*Postgraduate Student of the Department of International Economic
Relations and Logistics*

*Education and Research Institute "Karazin Institute of International
Relations and Travel Business"*

V. N. Karazin Kharkiv National University

ORCID: 0009-0007-1798-2054

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ КРАЇН ЄС COMPLEX ANALYSIS OF EU ENERGY SECURITY

Анотація. *Вступ. Забезпечення енергетичної безпеки в умовах геополітичної нестабільності, високої цінової волатильності та прискореної декарбонізації є одним із ключових пріоритетів політики Європейського Союзу. Традиційні методи аналізу, що зосереджуються лише на фізичному забезпеченні ресурсів, виявляються недостатніми для комплексної оцінки сучасних ризиків, які включають інфраструктурні, економічні, екологічні та геополітичні аспекти. У зв'язку з цим актуальним є застосування інтегральних індексів та методів багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяють сформувати цілісне бачення стану енергетичної безпеки країн ЄС.*

Мета. Метою статті є обґрунтування та застосування інтегрального показника енергетичної безпеки (ШПЕБ) для 27 країн ЄС, а також кластеризація країн з метою виявлення структурних моделей їхньої енергетичної безпеки.

Матеріали і методи. У роботі використано дані Eurostat, IEA, ENTSO-E, GIE та ACER за 2013–2023 рр. Методичний інструментарій включає індикативний аналіз, стандартизацію змінних, формування таксономічного інтегрального показника, ієрархічну кластеризацію за методом Уорда та подальший метод *k*-середніх. Структурні відмінності в кластерах уточнювалися за допомогою аналізу дисперсії (ANOVA).

Результати. Розраховано інтегральний показник енергетичної безпеки та шість складових вимірів: фізична доступність, економічна доступність, інфраструктурна доступність, сталість, стійкість та незалежність. За підсумками кластерного аналізу сформовано п'ять кластерів країн ЄС: інфраструктурно інтегровані країни з обмеженою ресурсною базою (кластер 1); енергоефективні країни з високою самозабезпеченістю (кластер 2); країни з помірним, але структурно вразливим профілем (кластер 3); лідери «зеленої» та стійкої енергетики (кластер 4); промислово орієнтовані екологічно вразливі країни (кластер 5). Для кожного кластера надано оцінку сильних і слабких сторін та визначено ключові напрями політики.

Перспективи. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на економетричному моделюванні детермінант енергетичної безпеки, оцінці сценаріїв розвитку (STEPS, APS, NZE) та аналізі впливу політик «зеленого» переходу на рівень енергетичної незалежності та стійкості країн ЄС.

Ключові слова: енергетична безпека, інтегральний індекс, кластерний аналіз, країни ЄС, стійкість енергосистеми, енергетична незалежність.

Summary. *Introduction.* Ensuring energy security has become a critical strategic priority for the European Union amid geopolitical instability, extreme price volatility and the acceleration of the green transition. Traditional approaches focused solely on physical supply fail to capture the multidimensional nature of modern risks, including infrastructural, economic, environmental and geopolitical challenges. This creates the need for composite indices and multidimensional statistical methods that enable a holistic assessment of energy security across EU Member States.

Purpose. The purpose of this article is to substantiate and apply an Integral Energy Security Index (IESI) for 27 EU countries and to conduct a cluster analysis in order to identify structural models of their energy security.

Materials and methods. The study employs data from Eurostat, IEA, ENTSO-E, GIE and ACER for the period 2013–2023. The methodological toolkit includes indicator analysis, standardisation of variables, formation of a taxonomic composite index, hierarchical agglomerative clustering (Ward's method) and k-means clustering. Structural differences between clusters were validated using analysis of variance (ANOVA).

Results. The Integral Energy Security Index was calculated along with six dimensions: availability, affordability, accessibility, sustainability, resilience, and independence. As a result of the cluster analysis, five distinct groups of EU countries were identified, including: infrastructure-integrated countries with limited resource bases (Cluster 1); energy-efficient, self-sufficient countries (Cluster 2); countries with moderate yet structurally vulnerable profiles (Cluster 3); leaders of green and resilient energy systems (Cluster 4); and industrially oriented environmentally vulnerable countries (Cluster 5). Strengths and weaknesses of each cluster were analysed, and policy recommendations were developed accordingly.

Discussion. Future research may include econometric modelling of energy-security determinants, scenario-based forecasting (STEPS, APS, NZE), and

quantitative assessment of how the EU's green transition policies affect energy independence and systemic resilience.

Key words: *energy security, composite index, cluster analysis, EU countries, energy system resilience, energy independence.*

Постановка проблеми. Енергетична безпека стала одним із ключових структурних викликів для Європейського Союзу у посткризовий період після енергетичної кризи 2022 р., спричиненої геополітичною ескалацією, порушенням ланцюгів постачання та різкою волатильністю світових енергетичних ринків. У цих умовах традиційні підходи до оцінювання енергетичної безпеки, що спиралися переважно на окремі індикатори залежності від імпорту чи диверсифікації постачальників, виявилися недостатніми для комплексного аналізу стійкості національних енергосистем.

Сучасні енергетичні виклики потребують багатовимірного підходу, який одночасно охоплює фізичну, економічну, інфраструктурну та екологічну складові енергетичної безпеки, а також стійкість і незалежність енергосистем. Додатковою проблемою є те, що система енергетичної безпеки ЄС є гетерогенною: країни відрізняються за енергетичним балансом, залежністю від імпорту, інфраструктурною інтегрованістю, темпами розвитку ВДЕ та здатністю протистояти ринковим і геополітичним шокам. Тому кластеризація на основі інтегральних показників є необхідним інструментом для виявлення структурних груп країн за моделями енергетичної безпеки.

Отже, існує потреба у комплексному аналізі багатовимірних показників енергетичної безпеки країн ЄС, формуванні інтегрального індексу, визначенні типових моделей і кластерів, а також оцінюванні їхньої динаміки впродовж 2013–2023 рр.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження пропонують низку підходів для комплексної оцінки енергетичної безпеки країн ЄС на основі інтегральних показників та багатовимірної аналізу. Розроблено десятки інтегральних індексів енергетичної безпеки, які поєднують показники різних аспектів енергобезпеки (доступність ресурсів, диверсифікація постачань, економічна доступність, екологічна сталість тощо) [1-11]. Поступово підходи еволюціонували від простих одиничних показників до складніших багатокритеріальних методів оцінювання (MCDM), що враховують кілька вимірів одночасно [12]. Водночас дослідники відзначають обмеження традиційних агрегованих індексів: усереднення результатів за різними компонентами може приховувати вразливі місця енергосистеми [12]. У відповідь з'являються нові підходи, зокрема кластерний аналіз для типологізації країн за рівнем енергетичної безпеки. О. Івашко, А. Сімахова, В. Соляков в роботі із застосуванням нейронних мереж (карти Кохонена) виокремила три групи країн ЄС – з високим, середнім та низьким рівнем енергобезпеки [14], що дозволяє формувати диференційовані рекомендації політики для кожного типу.

Провідні міжнародні організації та аналітичні центри також приділяють значну увагу енергетичній безпеці ЄС, зокрема типологізації ризиків, оцінці вразливостей і сценарному аналізу. Міжнародне енергетичне агентство (ІЕА) у своїх доповідях акцентує на нових вимірах енергетичної безпеки під час енергетичного переходу, зокрема наголошуючи на вразливості, пов'язаній з високою концентрацією постачання критичних мінералів для «зеленої» енергетики. Європейська Комісія (спільно зі Спільним дослідницьким центром, JRC) здійснює регулярні стрес-тести та сценарне моделювання: останні навчання підтвердили підвищену стійкість газопостачання ЄС до екстремальних перебоїв завдяки впровадженню заходів, як-от розширення імпорту СПГ та оновлення планів надзвичайних

дій. Водночас аналітики попереджають, що попри скорочення залежності від російських енергоносіїв після 2022 року, європейська енергосистема залишається вразливою до зовнішніх шоків [14-20].

Попри значну кількість робіт, залишається недостатньо розробленим питання кластеризації країн ЄС на основі комплексного інтегрального індексу, що включає не лише доступність та незалежність, але й стійкість, структурні характеристики енергосистеми та екологічні аспекти. Більшість існуючих робіт також не враховує динаміку індексів у довгостроковому періоді.

Таким чином, це дослідження присвячено формуванню інтегрального показника енергетичної безпеки, проведенні кластеризації країн ЄС та оцінці їхніх структурних відмінностей і динаміки за 2013–2023 рр.

Метою статті є розроблення та застосування інтегрального показника енергетичної безпеки (ШПЕБ) для країн Європейського Союзу, що базується на шести ключових вимірах (фізична доступність, економічна доступність, інфраструктурна доступність, екологічна сталість, стійкість та енергетична незалежність), а також виявлення структурних моделей енергетичної безпеки шляхом кластеризації країн ЄС із використанням методів багатовимірної статистичної аналізи. Додатковою складовою є оцінка динаміки індексів та міжкластерних переходів у 2013–2023 рр. з метою визначення траєкторій розвитку енергетичних систем та факторів їхньої стійкості.

Матеріали і методи. Інформаційною базою дослідження є офіційні статистичні дані Eurostat, Міжнародного енергетичного агентства (IEA), ENTSO-E, Gas Infrastructure Europe (GIE), Європейської комісії та ACER за період 2013–2023 рр. для 27 країн-членів ЄС. Вибір зазначених джерел зумовлений їхньою високою ступінню верифікованості, репрезентативністю та узгодженістю методології збору даних у часі, що є критично важливим для порівняльного аналізу та побудови інтегральних індексів.

Методологічне підґрунтя дослідження ґрунтується на поєднанні індикативного, порівняльного та багатовимірного статистичного аналізу. Вивчення міжнародного та європейського досвіду свідчить, що найбільш ефективними для оцінки енергетичної безпеки є підходи, які комбінують:

- індикативний аналіз — для моніторингу прогресу й виявлення відхилень від цільових орієнтирів;
- порівняльний аналіз (benchmarking) — для ранжування країн і виявлення типових моделей розвитку;
- методи багатовимірної статистики — для виявлення латентних закономірностей, структурних відмінностей і групування країн за профілями енергетичної безпеки.

У даному дослідженні пропонується трактувати енергетичну безпеку як динамічний стан енергетичної системи, що характеризується що відображає її здатність забезпечувати економіку та суспільство доступними, надійними, економічно та екологічно прийнятними та диверсифікованими енергоресурсами, а також протистояти зовнішнім і внутрішнім ризикам, відновлюватися після шоків та зберігати стратегічну автономність у довгостроковому періоді.

У даній роботі центральним інструментом є розроблений автором композитний «Інтегральний показник енергетичної безпеки» (ШПЕБ), який операціоналізує багатовимірну концепцію енергетичної безпеки в контексті зеленого переходу. Структура ШПЕБ базується на шести фундаментальних вимірах, що узагальнюють підходи ЄС, WEC, IEA та наукових досліджень:

1. фізична доступність (Availability);
2. економічна доступність (Affordability);
3. інфраструктурна доступність (Accessibility);
4. прийнятність / сталість (Sustainability);
5. стійкість (Resilience);
6. незалежність (Independence).

Кожен вимір описується групою кількісних індикаторів, які є публічно доступними, однозначно інтерпретованими та відображають ключові аспекти енергетичної безпеки.

Таблиця 1

Архітектура Інтегрального показника енергетичної безпеки (ІПЕБ)

Вимір	Індикатор	Обґрунтування включення
1. Фізична доступність (Availability)	Індекс диверсифікації постачання енергії	Вище значення індексу вказує на ширший набір джерел, що зменшує ризик дефіциту окремого ресурсу чи постачальника.
	Внутрішнє виробництво первинної енергії, % від спож.	Відображає рівень самозабезпеченості країни власними енергоресурсами, зменшуючи потребу в імпорті.
2. Економічна доступність (Affordability)	Ціни на електроенергію для домогосподарств, €/кВт·год	Прямий індикатор фінансової доступності енергії; надмірно високі ціни означають підвищене навантаження на споживачів та ризик енергетичної бідності.
	Енергоемність економіки, кг н.е./€	Індикатор загальної енергоефективності економіки; нижче значення свідчить про меншу вразливість економіки до коливань цін на енергоносії.
3. Інфраструктурна доступність (Accessibility)	Рівень взаємозв'язку електромереж, %	Відображає здатність країни імпортувати/експортувати електроенергію: високий відсоток інтерконекторів підвищує гнучкість мережі та безпеку постачання.
	Втрати при передачі та розподілі, %	Індикатор технічної ефективності та стану мережевої інфраструктури; нижчі втрати свідчать про кращий стан мереж.
	Частка найбільшого виробника, %	Характеризує рівень конкуренції на ринку генерації; менша частка вказує на більш конкурентний та стійкий ринок.
4. Прийнятність / Сталість (Sustainability)	Частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні, %	Основний індикатор переходу на чисті джерела: зростання частки ВДЕ зменшує викиди та залежність від викопного палива, покращуючи екологічну прийнятність.
	Інтенсивність викидів ПГ, %	Відображає вплив енергетики на клімат; нижча інтенсивність означає більш стійку та екологічно прийнятну енергосистему.

5. Стійкість (Resilience)	Storage-to-Consumption Ratio, %	Характеризує загальний запас міцності системи зберігання відносно потреб споживання; вищий показник свідчить про кращу здатність витримувати перебої.
	Місткість газових сховищ, %	Відображає обсяг запасів газу, який може бути збережений для покриття сезонного попиту або у випадку перебоїв у постачанні.
	Стратегічні запаси нафти, дні	Показник готовності до нафтових шоків: відображає, на скільки днів вистачить накопичених резервів нафти для забезпечення внутрішнього споживання.
6. Незалежність (Independence)	Чиста енергетична імпортозалежність, %	Ключовий показник вразливості до зовнішніх шоків та залежності від глобальних ринків; нижче значення означає вищу енергетичну незалежність.
	Концентрація імпорту газу (ННІ)	Кількісно оцінює диверсифікацію зовнішніх джерел газу; нижчий ННІ означає, що імпортований обсяг розподілений між багатьма постачальниками, що підвищує безпеку.

Джерело: складено автором

Оскільки вихідні показники мають різні одиниці виміру й масштаби, першим етапом є їх стандартизація. Формується вихідна матриця спостережень

$X = \{x_{ij}\}$, де x_{ij} – значення j -го індикатора для i -ї країни ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$).

Для усунення впливу розмірності застосовується Z -стандартизація:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$$

де y_{ij} – стандартизоване значення j -го показника для i -ї країни; $\bar{x}_j$ – середнє значення j -го показника; σ_j – його стандартне відхилення.

Далі враховується спрямованість впливу індикаторів на енергетичну безпеку. Показники поділяються на стимулятори (зростання яких підвищує рівень ЕнБ, наприклад, частка ВДЕ, рівень інтерконекторів) та дестимулятори (зростання яких знижує її, наприклад, енергоємність, імпортозалежність, інтенсивність викидів). Для стимуляторів

використовуються стандартизовані значення без змін, для дестимуляторів виконується інверсія:

$$y'_{ij} = -y_{ij},$$

що забезпечує єдину інтерпретацію: більше значення трансформованого показника завжди відповідає вищому рівню енергетичної безпеки.

На наступному кроці формується еталонний вектор найкращого стану енергетичної безпеки $Z_0 = (z_{01}, \dots, z_{0n})$, елементами якого є максимальні (для стимуляторів) або мінімальні за модулем (для дестимуляторів після інверсії) значення відповідних стандартизованих показників. Для кожної країни обчислюється евклідова відстань до еталона:

$$C_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_{0j})^2},$$

де z_{ij} – трансформоване стандартизоване значення j -го показника для i -ї країни. На основі отриманих відстаней розраховується таксономічний інтегральний показник:

$$I_i = 1 - \frac{C_{i0}}{C_0},$$

де C_0 – нормалізуючий коефіцієнт, що залежить від середнього та стандартного відхилення відстаней C_{i0} . Значення I_i набувають значень у діапазоні $(0;1)$, при цьому чим ближче I_i до 1, тим вищий рівень енергетичної безпеки країни. Для зручності інтерпретації у статті результати додатково перетворюються у шкалу 0–100 балів, що дозволяє співвідносити ПІЕБ з іншими міжнародними індексами.

Окремо розраховуються часткові інтегральні індекси за кожним із шести вимірів, що дає змогу не лише отримати агрегований рейтинг країн, але й провести діагностичний аналіз їхніх сильних і слабких сторін за структурою енергетичної безпеки.

Для переходу від індивідуального ранжування країн до виявлення типових моделей енергетичної безпеки застосовується кластерний аналіз. На першому етапі використано ієрархічну агломеративну кластеризацію з метрикою квадратів евклідової відстані та методом об'єднання Уорда (Ward's method). Як вхідні змінні використовувалися значення ІПЕБ за шістьма вимірами для 2023 року, нормалізовані у шкалі 0–100. На основі аналізу дендрограми та агломеративних коефіцієнтів було обґрунтовано доцільність виділення п'яти кластерів країн ЄС, що забезпечує баланс між статистичною однорідністю груп і їх економічною інтерпретованістю.

На другому етапі кластеризації застосовано метод k -середніх (k -means) із фіксованим числом кластерів $k = 5$. Алгоритм ітеративно мінімізує суму квадратів відстаней країн до центрів кластерів, що дозволяє отримати стабільні профілі груп. Для перевірки статистичної значущості відмінностей між кластерами за окремими вимірами ІПЕБ використано однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA).

У межах статті також проведено динамічний аналіз ІПЕБ та його складових за 2013–2023 рр., що дозволяє простежити еволюцію енергетичної безпеки окремих країн та кластера в цілому, зокрема в контексті енергетичної кризи 2021–2022 рр. та реалізації пакету політик REPowerEU. Розрахунки інтегральних показників, стандартизація, кластеризація та ANOVA здійснювалися з використанням програмного пакету IBM SPSS Statistics v. 31.0.1.0 (49).

Запропонований комплекс методів забезпечує поєднання глибини кількісного аналізу з наочністю інтерпретації результатів, дозволяє здійснити як рейтингування країн за рівнем енергетичної безпеки, так і їх типологізацію за структурними моделями, що становить інформаційне підґрунтя для формування диференційованих рекомендацій.

Виклад основного матеріалу. Традиційні джерела енергії, такі як тверде викопне паливо (вугілля), нафта та нафтопродукти, природний газ та

ядерна енергія, історично становили основу енергетичного балансу Європейського Союзу. Однак протягом останнього десятиліття (2012-2023 рр.) їхня роль зазнала суттєвих змін під впливом політики декарбонізації, міркувань енергетичної безпеки та розвитку альтернативних технологій.

Незважаючи на зниження внутрішнього виробництва, традиційні джерела продовжують домінувати у структурі валової доступної енергії (Gross Available Energy, GAE) ЄС, хоча їх сукупна частка поступово зменшується (рис. 1). У 2022 році нафта та нафтопродукти все ще становили найбільшу частку (36.8%), за ними йшов природний газ (21.1%) та тверде викопне паливо (11.6%) [21]. Сукупно ці три види викопного палива забезпечували 69.5% усієї доступної енергії в ЄС. Ядерна енергія забезпечувала ще 11.1% [21]. Важливо відзначити значне скорочення споживання (а отже, і валової доступної енергії) природного газу у 2022 році – на 13.3% порівняно з 2021 роком, що значною мірою було зумовлено заходами зі скорочення попиту у відповідь на енергетичну кризу. Загальна валова доступна енергія в ЄС у 2022 році знизилася на 4.5% порівняно з 2021 роком, а попередні дані за 2023 рік вказують на подальше зниження [22].

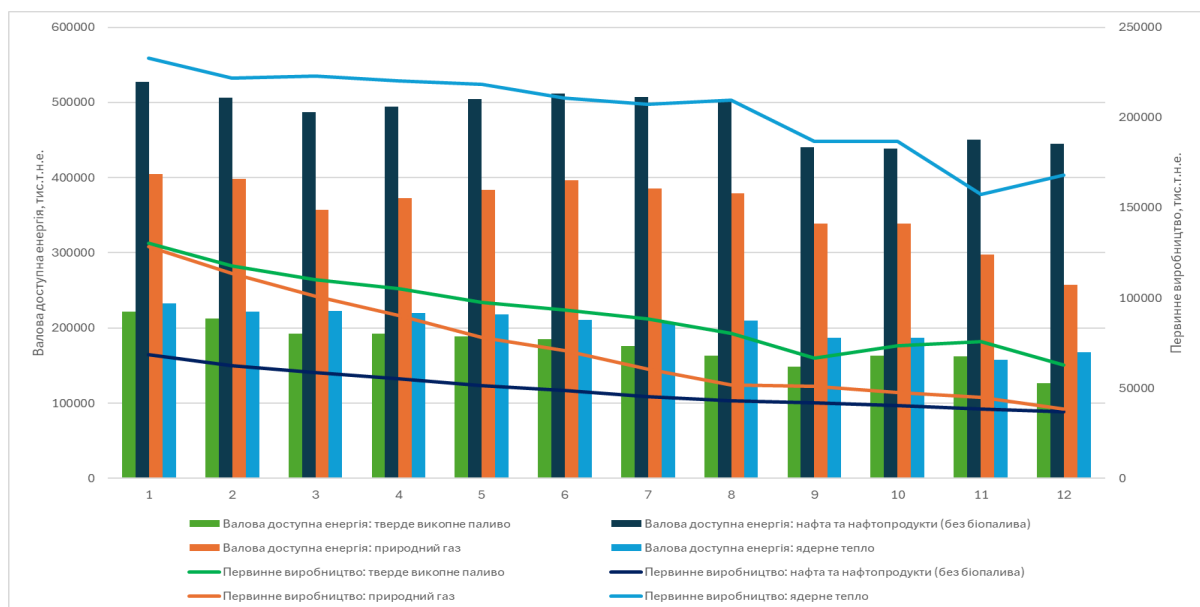


Рис. 1. Первинне виробництво та валова доступна енергія традиційних джерел, ЄС-27, 2012-2023 (тис. т н.е.).

Джерело: складено автором за матеріалами [23]

Паралельно зі скороченням ролі традиційних енергоресурсів, Європейський Союз демонструє динамічний розвиток сектору відновлюваної енергетики. Цей процес підживлюється політичною підтримкою, технологічним прогресом та зростаючою економічною привабливістю ВДЕ.

Одним з ключових індикаторів розвитку ВДЕ є зростання встановленої генеруючої потужності (рис. 2). За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), сукупна встановлена потужність ВДЕ в ЄС-27 стрімко зростала протягом останнього десятиліття [24]. Якщо у 2014 році вона становила близько 353 ГВт, то до кінця 2023 року досягла 641 ГВт. Особливо значне прискорення спостерігалось в останні роки [24], що відображає посилення кліматичних амбіцій та реакцію на енергетичну кризу.

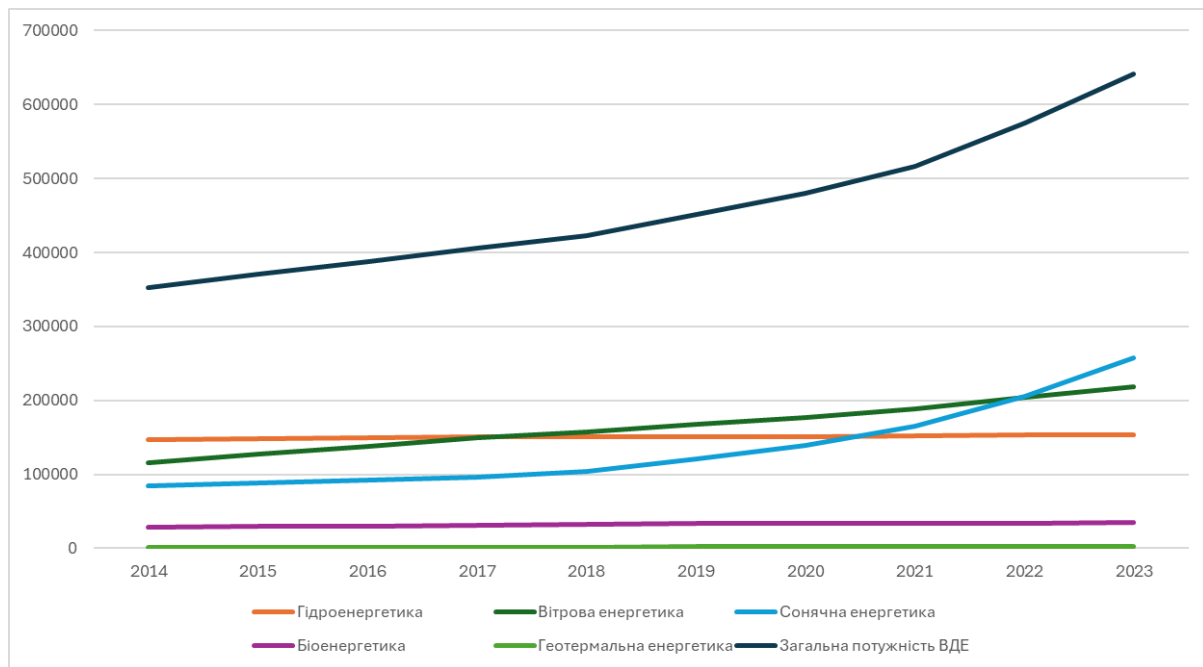


Рис. 2. Встановлена потужність ВДЕ за джерелами, ЄС-27, 2014-2023 (МВт)

Джерело: складено автором за матеріалами [21; 25-27]

Енергетичний перехід до системи, що базується на ВДЕ, несе в собі не лише можливості, але й низку взаємопов'язаних економічних ризиків, які

потребують ретельного аналізу та управління. Ці ризики можна згрупувати за кількома категоріями (рис. 3).

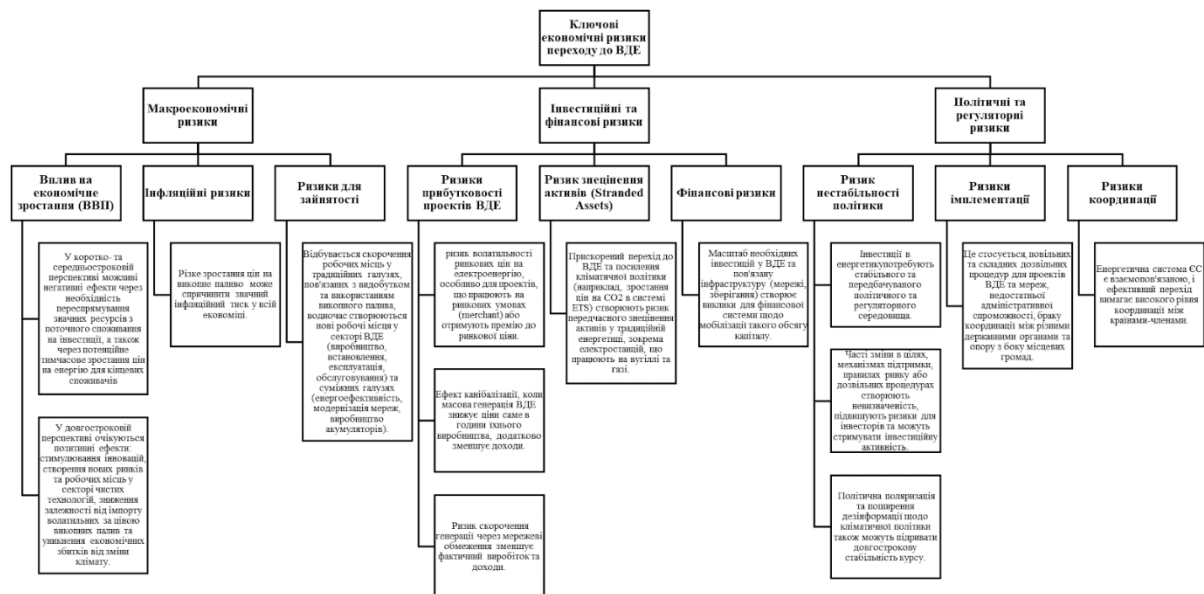


Рис. 3. Ключові економічні ризики переходу до ВДЕ

Джерело: розроблено автором

Сучасний стан енергетичної безпеки можна охарактеризувати, як нестабільний. Однак за окремими характеристиками аналізовані країни можуть займати як лідируючі, так і відстаючі позиції в порівняльному аналізі.

Узагальнені результати розрахунку ШЕБ демонструють суттєву неоднорідність рівня енергетичної безпеки в межах ЄС (рис. 4). Найвищі значення інтегрального показника спостерігаються у Фінляндії (65 балів), Швеції (63), Латвії (61), Австрії (60), Люксембургу (57) та Словенії (56). Ці країни поєднують відносно високу фізичну та інфраструктурну доступність ресурсів із розвиненими механізмами низьковуглецевого переходу та помірною імпортозалежністю.

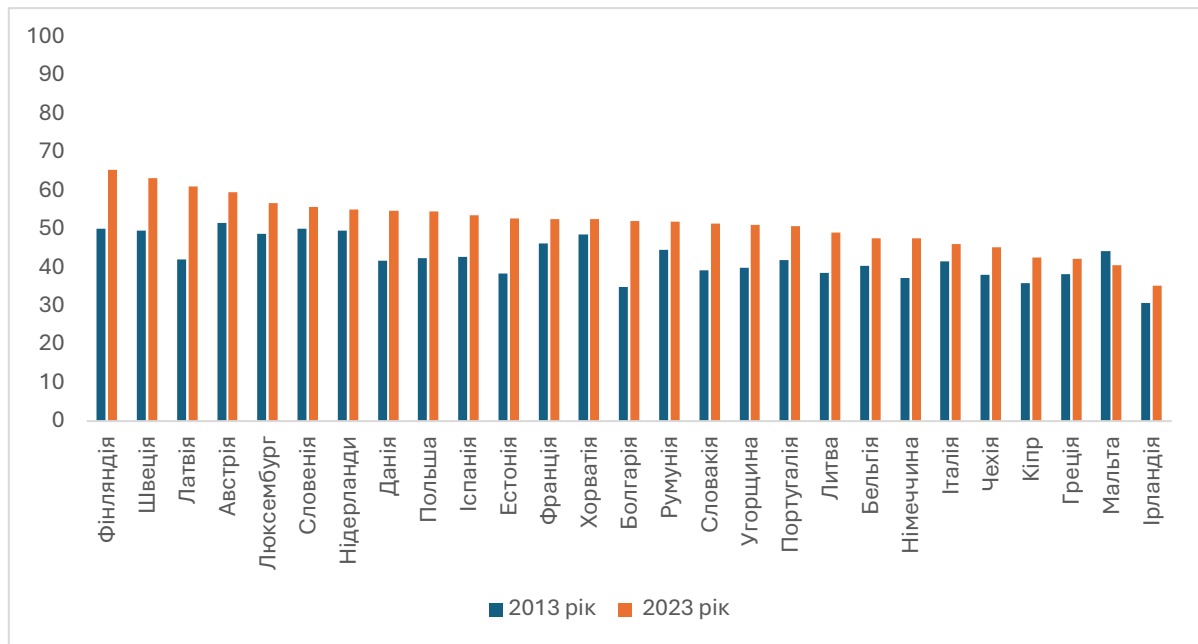


Рис. 4. Інтегральний показник енергетичної безпеки країн ЄС

Джерело: розраховано автором

До групи з помірним рівнем енергетичної безпеки (50–55 балів) належать Нідерланди, Данія, Польща, Португалія, Румунія, Болгарія, Іспанія, Естонія, Хорватія, Франція. Для них характерні змішані профілі: наявність сильної сторони в одному або двох вимірах (наприклад, високий рівень ВДЕ чи розвинені міждержавні інтерконектори) поєднується з вразливістю до цінових шоків або залежністю від імпорту окремих видів палива.

Найнижчі значення ПЕБ отримали Ірландія (35), Мальта (41), Греція (42), Кіпр (43), Чехія (45) та Італія (46). Їх відрізняє поєднання високої імпортозалежності, обмежених можливостей зберігання енергоресурсів, відносно високих цін на електроенергію та, у ряді випадків, недостатньо розвиненої інфраструктурної доступності.

Особливістю запропонованої системи є можливість не лише ранжувати країни за інтегральним показником, але й діагностувати сильні та слабкі сторони кожної з них за окремими вимірами. Наприклад, Швеція та Фінляндія демонструють одночасно високі значення за виміром

«Сталості» (100 та 85 балів відповідно) та «Стійкості», тоді як Бельгія і Німеччина мають порівняно високі показники «Незалежності», але відстають за екологічними параметрами (Sustainability).

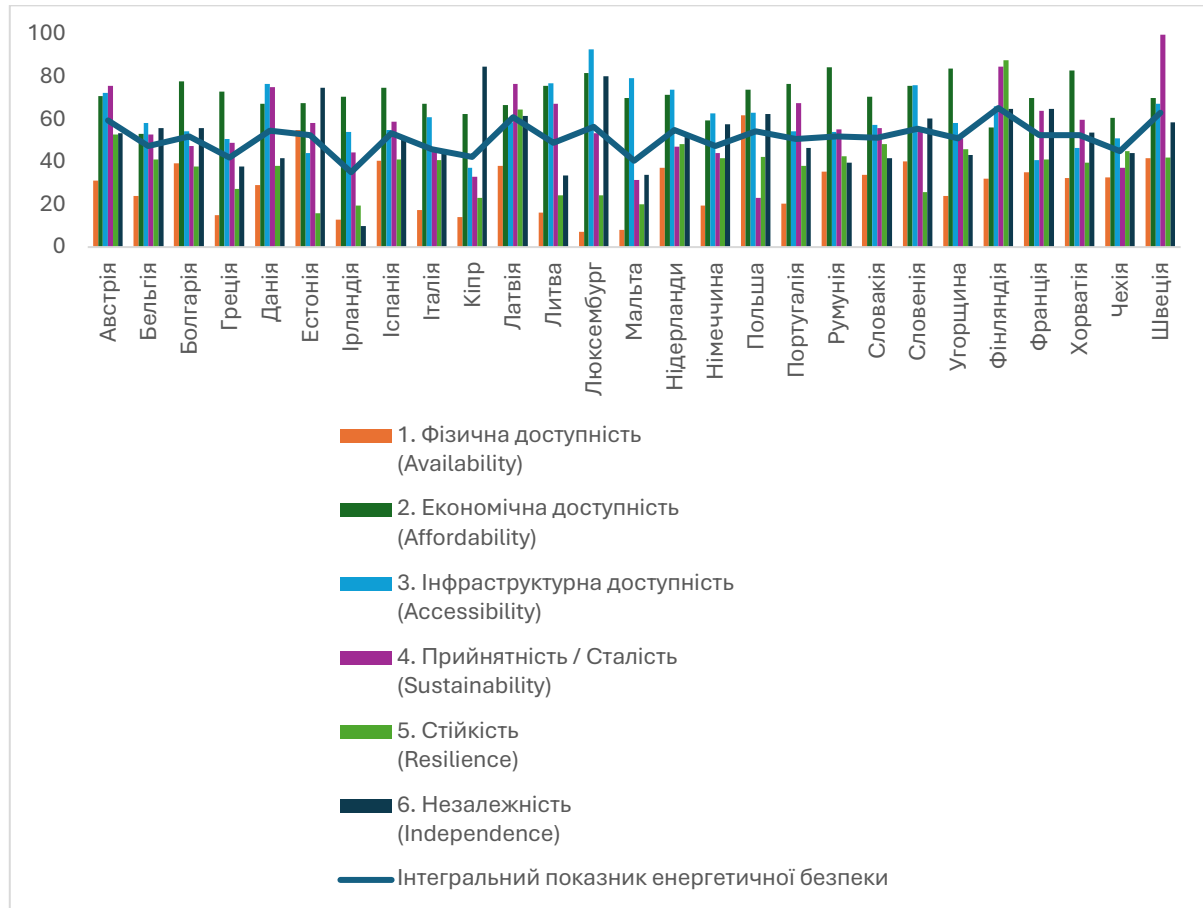


Рис. 5. Показник енергетичної безпеки країн ЄС (інтегральний і за вимірами)

Джерело: розраховано автором

Для поглибленої інтерпретації отриманих результатів та виявлення типових моделей енергетичної безпеки було застосовано кластерний аналіз. Як вхідні змінні використовувалися часткові індекси за шістьма вимірами (Availability, Affordability, Accessibility, Sustainability, Resilience, Independence), нормовані у шкалі 0–100. Модель з п'ятьма кластерами продемонструвала найкращий баланс між статистичною значущістю та економічною інтерпретованістю. Усі шість вимірів мають значні відмінності між кластерами ($\text{Sig} < 0,05$ в ANOVA), а розподіл країн за групами є збалансованим (4–2–11–4–6 країн у кластері відповідно).

Результати кластеризації методом k-середніх (рис. 6, табл. 2) дозволили виділити п'ять типових профілів енергетичної безпеки в ЄС.



Рис. 6. Кластерні профілі країн ЄС за вимірами енергетичної безпеки

Джерело: розраховано автором

Таблиця 2

Кластерні профілі країн ЄС за за вимірами енергетичної безпеки

№ кластера	Умовна назва кластера	Країни	Сильні сторони профілю ЕнБ	Слабкі сторони профілю ЕнБ
1	Інфраструктурно інтегровані, але ресурсно обмежені країни	Данія, Люксембург, Нідерланди, Словенія	Висока інфраструктурна доступність (розвинені мережі та інтерконектори), відносно високий рівень енергетичної незалежності та диверсифікації постачання.	Обмежена фізична доступність ресурсів і можливості зберігання, порівняно невисока стійкість до тривалих шоків без підтримки з боку ринку ЄС.
2	Енергоефективні країни з високою самозабезпеченістю	Естонія, Франція	Підвищена фізична та економічна доступність (значна власна генерація, відносно прийнятні ціни), помірно високий рівень	Менш розвинена мережева інтегрованість та інфраструктурна гнучкість, стійкість до шоків і екологічна складова

			незалежності від імпорту.	не досягають рівня лідерів.
3	Країни з помірним, але структурно вразливим профілем ЕНБ	Хорватія, Греція, Угорщина, Ірландія, Італія, Литва, Мальта, Португалія, Румунія, Словаччина, Іспанія	Середня або добра економічна доступність енергії, помітний прогрес у ВДЕ та модернізації інфраструктури.	Висока імпортозалежність і обмежені запаси/потужності зберігання, недостатня стійкість до цінових і геополітичних шоків, неоднорідність якості інфраструктури.
4	Лідери зеленої та стійкої енергетичної безпеки	Австрія, Фінляндія, Латвія, Швеція	Дуже високі показники сталості (Sustainability) та інфраструктурної доступності, розвинені ВДЕ, значні можливості зберігання, підвищена стійкість енергосистеми.	Відносно вища вартість енергії для споживачів і обмежена власна ресурсна база можуть виступати стримуючими факторами, що потребують постійної оптимізації політики.
5	Промислово орієнтовані, екологічно вразливі країни	Бельгія, Болгарія, Кіпр, Чехія, Німеччина, Польща	Достатньо високий рівень фізичної доступності та незалежності, значна роль у європейському енергоринку, розвинена промислова інфраструктура.	Низькі значення сталості: висока частка викопного палива у балансі, підвищені викиди ПГ, відставання від кліматичних цілей ЄС, що створює ризики довгострокової несумісності з політикою Green Deal.

Джерело: складено автором

Побудований інтегральний показник енергетичної безпеки (ІПЕБ) було розраховано не лише в поперечному зрізі, але й у динаміці за період 2013–2023 рр. для 27 країн ЄС. Це дозволило проаналізувати, наскільки стабільними є виявлені профілі та кластери, а також простежити реакцію енергетичних систем на ключові зовнішні шоки – газові кризи 2014 та 2022

років, пандемію COVID-19 та прискорення «зеленого» переходу після ухвалення Європейського Зеленого курсу.

Отримані ряди свідчать, що для більшості країн ЄС ППЕБ має поступову висхідну траєкторію. Наприклад, для Австрії інтегральний показник зріс з 52 балів у 2013 р. до 58 балів у 2023 р., для Бельгії – з 41 до 47 балів, для Болгарії – з 35 до 51 балу, для Румунії – з 45 до 53 балів, для Швеції – з 50 до 64 балів. Подібну позитивну динаміку демонструють Нідерланди, Португалія, Латвія, Литва, Словенія, Іспанія та Польща. Це свідчить про загальне посилення енергетичної безпеки в ЄС за останнє десятиріччя.

Паралельно спостерігається структурна зміна внеску окремих вимірів. У більшості країн покращилися індикатори сталості (Sustainability) – зростала частка ВДЕ та зменшувалася інтенсивність викидів ПГ (наприклад, у Португалії, Іспанії, Данії, Італії, Румунії), а також інфраструктурної доступності (Accessibility) завдяки розбудові інтерконекторів та модернізації мереж. Водночас після 2021–2022 рр. у значної частини країн погіршилися показники економічної доступності (Affordability), що відображає цінову кризу на ринку газу та електроенергії, тоді як індикатори стійкості (Resilience) та незалежності (Independence) у багатьох випадках зросли за рахунок нарощення газових запасів, розвитку LNG-інфраструктури та диверсифікації імпорту.

Кластер 4 – «Лідери зеленої та стійкої енергетичної безпеки» (Австрія, Фінляндія, Латвія, Швеція) демонструє найбільш виражений та послідовний ріст ППЕБ.

- У Фінляндії інтегральний показник зріс з 50 балів у 2013 р. до 68 балів у 2023 р., причому ключовий внесок забезпечило нарощення частки ВДЕ та різке підвищення показника стійкості (Resilience) після 2020 р., коли індикатор досяг 100 балів.

- Латвія підвищила ІПЕБ з 42 до 63 балів; помітним є перехід від середніх значень Availability та Accessibility у першій половині періоду до високих значень за всіма вимірами наприкінці, зокрема за рахунок зростання частки ВДЕ та поліпшення інфраструктурної інтегрованості.
- Швеція посилила свій статус лідера «зеленої» безпеки: ІПЕБ збільшився з 50 до 64 балів, а показник Sustainability досяг максимуму (100 балів у 2022–2023 рр.), що відображає майже повну декарбонізацію електрогенерації. У підсумку саме країни цього кластера забезпечили найвищий середній приріст ІПЕБ за десятиріччя, підтверджуючи стійкість обраної ними моделі енергетичного переходу.

Кластер 5 – «Промислово орієнтовані, екологічно вразливі країни» (Бельгія, Болгарія, Кіпр, Чехія, Німеччина, Польща) демонструє помірний, але стійкий ріст ІПЕБ на тлі повільної декарбонізації.

- У Німеччині інтегральний показник зріс із 37 до 47 балів, головним чином за рахунок покращення індикаторів інфраструктурної доступності та незалежності (диверсифікація імпорту, розвиток відновлюваних джерел), однак показники сталості залишаються відносно низькими.
- Польща підвищила ІПЕБ з 42 до 49 балів, що супроводжувалося ростом індикаторів Resilience та Independence, хоча Sustainability зростає значно повільніше через збереження високої частки вугілля у балансі.
- Болгарія зробила найбільший ривок у кластері: від 35 балів у 2013 р. до 51 балу у 2023 р., завдяки покращенню цінової доступності, зростанню частки ВДЕ та істотному зміцненню показника Independence після 2020 р.

Загалом для цього кластера характерна поступова адаптація промислово орієнтованих енергосистем до кліматичної політики ЄС, однак екологічна складова (Sustainability) залишається головним «вузьким місцем».

Кластер 3 – «Країни з помірним, але структурно вразливим профілем» (Греція, Хорватія, Угорщина, Ірландія, Італія, Литва, Мальта, Португалія, Румунія, Словаччина, Іспанія) демонструє неоднорідну, але переважно позитивну динаміку.

- Іспанія підвищила ППБ з 43 до 50 балів, причому основний приріст забезпечило зростання Sustainability та Resilience завдяки швидкому введенню потужностей ВДЕ і розвитку інтерконекторів.
- Португалія – з 42 до 51 балу, з аналогічним «зеленим» профілем зростання.
- Румунія покращила показник з 45 до 53 балів, що супроводжувалося суттєвим зростанням Resilience та Independence після 2019 р. Водночас Ірландія залишається одним із аутсайдерів: її ППБ коливається в межах 31–38 балів без виразного тренду, що пов'язано з високою імпортозалежністю, низькими значеннями показника Independence та обмеженими можливостями зберігання.

Кластер 1 – «Інфраструктурно інтегровані, але ресурсно обмежені країни» (Данія, Люксембург, Нідерланди, Словенія) демонструє відносно високі стартові значення та помірний приріст.

- У Данії ППБ зріс з 42 до 55 балів, з чітким посиленням Sustainability та Accessibility завдяки розвитку вітрової генерації та посиленню ролі міждержавних інтерконекторів.
- Нідерланди збільшили показник з 50 до 58 балів, особливо після 2019 р., коли було прискорено курс на скорочення видобутку газу Гронінгенського родовища та розбудову альтернативних каналів імпорту.

- Словенія зберігає стабільно високий рівень – близько 50–54 балів протягом усього періоду, що відображає збалансований, хоча й ресурсно обмежений профіль.

Кластер 2 – «Енергоефективні країни з високою самозабезпеченістю» (Естонія, Франція) демонструє стабільне, але більш плавне зростання.

- В Естонії ПІЕБ зріс з 39 до 53 балів, причому суттєвий приріст припадає на 2019–2020 рр., коли покращилися показники Affordability, Accessibility та Resilience завдяки модернізації мереж і збільшенню резервних потужностей.
- Франція підняла інтегральний показник з 46 до 53 балів, зберігаючи стабільно високий рівень Availability та Independence за рахунок ядерної генерації, при поступовому посиленні екологічної складової.

Напрями політики енергетичної безпеки мають бути диференційованими не лише за країнами, а й за типами профілів, виявлених кластерним аналізом (табл.9). Для кластера 4, який уже досяг найвищих значень інтегрального показника, ключовим завданням є не стільки нарощення «жорстких» показників, скільки утримання балансу між високою екологічною амбітністю та соціальною прийнятністю енергетичної політики. Навпаки, кластер 5 потребує першочергової уваги до декарбонізації важкої промисловості при одночасному посиленні стійкості та диверсифікації імпорту.

Таблиця 3

Напрями покращення енергетичної безпеки країн ЄС за кластерами

Кластер	1	2	3	4	5
Стратегічний фокус	Зміцнення ресурсної бази та буферів безпеки при збереженні високого рівня	Поглиблення інтеграції до ринку ЄС та прискорення декарбонізації при збереженні	Зменшення імпортозалежності та підвищення стійкості через розширення ВДЕ й модернізації	Консолідація досягнутого лідерства та зниження соціальних і цінових ризиків «зеленої»	Структурна декарбонізація при збереженні промислової конкурентоспроможності та зміцненні стійкості

	інтегрованості ринку	самозабезпеченості	ю інфраструктури	трансформації	
Фізична доступність (Availability)	Диверсифікація джерел палива, розширення портфеля ВДЕ-проектів (морська вітрова та офшорна енергетика)	Оптимізація структури національної генерації (зменшення ролі вуглецевоємних палив, розвиток низьковуглецевих технологій)	Активізація розвідки та використання локальних ресурсів (сонячних, вітрових, біоенергетичних), розвиток децентралізованої генерації	Підтримка балансуєчих та маневрових потужностей для інтеграції високої частки ВДЕ	Поступове зменшення ролі вугілля та інших «брудних» палив, розвиток низьковуглецевих альтернатив у генерації
Економічна доступність (Affordability)	Таргетовані механізми підтримки домогосподарств та МСП у періоди цінової турбулентності	Удосконалення тарифної політики, адресна підтримка вразливих споживачів, стимулювання енергоефективності	Програми глибокої модернізації будівель та промисловості, розвиток механізмів енергетичної солідарності для вразливих груп	Оптимізація тарифних моделей, розширення програм енергоефективності для зниження витрат домогосподарств	Запровадження механізмів захисту енергоємних галузей і домогосподарств від цінових шоків, стимулювання енергоефективних інвестицій
Інфраструктурна доступність (Accessibility)	Подальший розвиток міждержавних інтерконекторів, впровадження smart-grids	Підвищення пропускної спроможності міждержавних ліній, розвиток регіональних ринків потужності	Розбудова інтерконекторів, зменшення втрат у мережах, цифровізація управління системою	Подальше підсилення перетинів з сусідніми системами, розвиток цифрових платформ керування попитом	Модернізація мереж і міждержавних перетинів з врахуванням зростання частки ВДЕ, розвиток систем гнучкого попиту
Прийнятність / Сталість (Sustainability)	Поглиблення декарбонізації системи генерації з фокусом	Прискорена заміна вуглецевоємних технологій у генерації та теплопостач	Масштабування ВДЕ, поетапне виведення з експлуатації вуглецевоє	Підтримка інновацій у сфері водневої енергетики, секторної інтеграції та	Масштабні програми переходу на ВДЕ, впровадження технологій CCS/CCU та

	на гнучких ВДЕ та зберіганні	анні, підтримка «зелених» інновацій	мних потужносте й, розвиток систем зберігання	«Power-to- X» рішень	«зеленого» водню в промисловості
Стійкість (Resilience)	Нарощення потужностей газових сховищ та систем акумуляції електроенергії, створення спільних регіональних резервів	Формування додаткових резервів газу й палива, участь у спільних механізмах аварійної підтримки ЄС	Збільшення місткості газових сховищ та резервних потужностей, впровадження планів аварійного реагування	Формалізація стратегічних запасів на надзвичайні періоди, інтеграція оцінки кліматичних ризиків до планування резервів	Розширення стратегічних запасів, особливо газу, створення додаткових сховищ і резервних потужностей
Незалежність (Independence)	Розвиток LNG- терміналів та регіональних платформ закупівель, зменшення залежності від окремих постачальників	Диверсифікація каналів імпорту енергоносіїв, зменшення залежності від окремих геополітичних векторів	Диверсифікація постачальників газу та нафти, участь у спільних закупівлях ЄС, зменшення ННІ імпорту	Збереження помірної імпортозалежності через довгострокові контракти та диверсифіковані портфелі, підтримка внутрішнього виробництва біопалив	Глибока диверсифікація імпорту газу та нафти (LNG, нові маршрути), зниження залежності від окремих постачальників та напрямів транспортування

Джерело: складено автором

Для інфраструктурно інтегрованих, але ресурсно обмежених країн (кластер 1) пріоритетним стає зміцнення фізичної бази безпеки — потужностей зберігання, LNG-інфраструктури та резервів. Енергоефективні самозабезпечені країни (кластер 2) мають зосередитися на поглибленні інтеграції до внутрішнього ринку ЄС й прискоренні декарбонізації, що дасть змогу перетворити національні моделі на «якорі» енергетичної стабільності регіону. Країни кластера 3, які мають помірні, але структурно вразливі

профілі, потребують комплексних рішень: від розширення ВДЕ та енергоефективності до розвитку інфраструктурних зв'язків і механізмів регіональної солідарності.

Узгоджене впровадження цих рекомендацій у межах загальноєвропейської політики дозволить не лише підвищити індивідуальний рівень ППБ окремих держав, але й посилити системну стійкість Енергетичного Союзу ЄС загалом, що є критично важливим в умовах тривалої геополітичної нестабільності та прискореного зеленого переходу.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведене дослідження підтверджує, що рівень енергетичної безпеки країн ЄС є багатовимірним та суттєво диференційованим, а його оцінка вимагає використання комплексного підходу. Розроблений інтегральний показник енергетичної безпеки (ППБ) дав змогу узагальнити шість ключових вимірів—фізичну та економічну доступність енергії, розвиненість інфраструктури, сталий розвиток, стійкість та енергетичну незалежність—та здійснити зіставлення країн ЄС за єдиною методологічною основою. Аналіз динаміки ППБ у 2013–2023 рр. показав, що хоча більшість держав демонструють поступове покращення показників, наслідки енергетичної кризи 2022 р. спричинили суттєві структурні зміни, зокрема зростання ролі виміру «Стійкість» та підсилення значення диверсифікації імпорту.

Результати кластерного аналізу виявили п'ять стійких моделей енергетичної безпеки, що відображають інституційні, ресурсні та інфраструктурні особливості енергосистем країн ЄС. Це дозволяє стверджувати, що заходи з підвищення безпеки постачання та зменшення залежності від імпорту мають бути диференційованими та орієнтованими на специфічні слабкі місця кожної групи держав, а не уніфікованими на рівні Союзу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення

механізмів стратегічного планування в рамках Європейського Зеленого Курсу та ініціативи REPowerEU.

У подальших наукових розвідках доцільно зосередити увагу на поглибленому аналізі чинників, що визначають рівень енергетичної безпеки в різних групах країн ЄС, шляхом застосування регресійного моделювання та факторного аналізу. Перспективним також є дослідження впливу технологічних інновацій, розвитку мереж накопичення енергії та цифровізації енергетичного сектору на зміни інтегрального показника. Подальше удосконалення методики оцінювання може передбачати розширення системи індикаторів за рахунок включення показників стабільності мережевої інфраструктури, ринку критичних матеріалів та ризиків зовнішніх шоків.

Особливу увагу варто приділити інтеграції України у європейський енергетичний простір. Розробка сценаріїв її потенційної кластерної належності та оцінка траєкторії розвитку енергетичної безпеки дозволять визначити стратегічні напрями реформ і узгодити їх із політикою ЄС. Це сприятиме подальшому вдосконаленню методичного підходу та розробці більш ефективних рекомендацій щодо мінімізації енергетичних ризиків і зміцнення стійкості енергетичних систем.

Література

1. Daniluk P. Strategic Analysis of Energy Security. Methodological Aspects of the Scenario Approach. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 15. P. 4639. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14154639>
2. Fleming R., Guérin M. Europe's security of gas supply legislation – a short legal history and latest developments. *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2023. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2231245>
3. Gasser P. A review on energy security indices to compare country

performances. *Energy Policy*. 2020. Vol. 139. P. 111339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111339>

4. Glynn J., Chiodi A., Ó Gallachóir B. Energy security assessment methods: Quantifying the security co-benefits of decarbonising the Irish Energy System. *Energy Strategy Reviews*. 2017. Vol. 15. P. 72–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.005>

5. Kharazishvili Y., Sukhodolia O., Riabtsev G., Kalinin O., Us G., Lunov Y. Enhancing Security in Sustainable Energy Systems for Central European Business: An Adaptive Response Methodology under National Economy. *Central European Business Review*. 2025. 14(4). P. 25-63. DOI: 10.18267/j.cebr.396

6. Sovacool B. K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*. 2011. Vol. 36, No. 8. P. 5343–5355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>

7. Stochastic Security Assessment for Power Systems With High Renewable Energy Penetration Considering Frequency Regulation / Y. Huang et al. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 6450–6460. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2880010>

8. Streimikiene D., Siksnylyte-Butkiene I., Lekavicius V. Energy Diversification and Security in the EU: Comparative Assessment in Different EU Regions. *Economies*. 2023. Vol. 11, no. 3. P. 83. DOI: <https://doi.org/10.3390/economies11030083>

9. Yu Z., Li J., Yang G. A Review of Energy Security Index Dimensions and Organization. *Energy RESEARCH LETTERS*. 2022. Vol. 3, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.46557/001c.28914>

10. Zhang Y., Tian X., Zhang L. A stochastic power flow-based static security assessment under uncertain scenarios. *Frontiers in Energy Research*. 2024. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1429160>

11. Ziembra P. Energy Security Assessment Based on a New Dynamic Multi-Criteria Decision-Making Framework. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 24. P.

9356. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249356>

12. Brodny J., Tutak M., Grebski W. W. Multi-Barrier Framework for Assessing Energy Security in European Union Member States (MBEES Approach). *Energies*. 2025. 18(18). 4905. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18184905>

13. Ivashko O., Simakhova A., Soliakov V., Choroszczak J. Clustering EU Member States by Energy Security Level Using Kohonen Maps. *Energies*. 2025. 18(17). 4750. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174750>

14. Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies - Scientific, technical publications in the nuclear field. IAEA. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1222_web.pdf (дата звернення: 20.11.2025).

15. Energy security assessment framework to support energy policy decisions. *European Union*. URL: https://ec.europa.eu/newsroom/know4pol/document.cfm?doc_id=64014 (дата звернення: 20.11.2025).

16. Energy union. *European Commission*. URL: https://energy.ec.europa.eu/strategy/energy-union_en (дата звернення: 20.11.2025).

17. From scenario planning to stress testing: The next step for energy companies. *McKinsey*. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/risk-and-resilience/our-insights/from-scenario-planning-to-stress-testing-the-next-step-for-energy-companies> (дата звернення: 20.11.2025).

18. International Energy Security Risk Index—Analysis of the Methodological Settings / I. Podbregar et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 12. P. 3234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13123234>

19. Security of EU electricity supply. *APREN*. URL: <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/acer-security-of-eu-electricity-supply-2024-compressed.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).

20. TRILEMMA INDEX 2022. *World Energy Council*. URL: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf (дата звернення: 20.11.2025).

21. Primary and final energy consumption in the European Union. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/primary-and-final-energy-consumption> (дата звернення: 20.11.2025).

22. EU primary energy consumption decreased by 4% in 2023 - News articles. *Eurostat*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241220-1> (дата звернення: 20.11.2025).

23. Share of energy consumption from renewable sources in Europe. *European Environment Agency*. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from> (дата звернення: 20.11.2025).

24. Renewable Power Generation Costs in 2021. *IRENA*. URL: <https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021> (дата звернення: 20.11.2025).

25. Figures & Tables. *European Union*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/f/fa/Workbook_Electricity_and_heat_statistics_edition_2023_REV.xlsx (дата звернення: 20.11.2025).

26. Energy efficiency statistics - Statistics Explained. *Eurostat*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_efficiency_statistics (дата звернення: 20.11.2025).

27. REPowerEU Tracker - Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA. *CGEP*. URL: <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/repowereu-tracker/> (дата звернення: 20.11.2025).

References

1. Daniluk, P. (2021). *Strategic analysis of energy security: Methodological aspects of the scenario approach*. *Energies*, 14(15), 4639. <https://doi.org/10.3390/en14154639>
2. Fleming, R., & Guérin, M. (2023). Europe's security of gas supply legislation – A short legal history and latest developments. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/02646811.2023.2231245>
3. Gasser, P. (2020). A review on energy security indices to compare country performances. *Energy Policy*, 139, 111339. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111339>
4. Glynn, J., Chiodi, A., & Ó Gallachóir, B. (2017). Energy security assessment methods: Quantifying the security co-benefits of decarbonising the Irish energy system. *Energy Strategy Reviews*, 15, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.005>
5. Kharazishvili, Y., Sukhodolia, O., Riabtsev, G., Kalinin, O., Us, G., & Lunov, Y. (2025). Enhancing security in sustainable energy systems for Central European business: An adaptive response methodology under national economy. *Central European Business Review*, 14(4), 25–63. <https://doi.org/10.18267/j.cebr.396>
6. Sovacool, B. K., & Mukherjee, I. (2011). Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*, 36(8), 5343–5355. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>
7. Huang, Y., et al. (2019). Stochastic security assessment for power systems with high renewable energy penetration considering frequency regulation. *IEEE Access*, 7, 6450–6460. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2880010>
8. Streimikiene, D., Siksnyte-Butkiene, I., & Lekavicius, V. (2023). Energy diversification and security in the EU: Comparative assessment in

different EU regions. *Economies*, 11(3), 83.
<https://doi.org/10.3390/economies11030083>

9. Yu, Z., Li, J., & Yang, G. (2022). A review of energy security index dimensions and organization. *Energy Research Letters*, 3(1).
<https://doi.org/10.46557/001c.28914>

10. Zhang, Y., Tian, X., & Zhang, L. (2024). A stochastic power flow-based static security assessment under uncertain scenarios. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1429160>

11. Ziemba, P. (2022). Energy security assessment based on a new dynamic multi-criteria decision-making framework. *Energies*, 15(24), 9356.
<https://doi.org/10.3390/en15249356>

12. Brodny, J., Tutak, M., & Grebski, W. W. (2025). Multi-barrier framework for assessing energy security in European Union member states (MBEES approach). *Energies*, 18(18), 4905. <https://doi.org/10.3390/en18184905>

13. Ivashko, O., Simakhova, A., Soliakov, V., & Choroszczak, J. (2025). Clustering EU member states by energy security level using Kohonen maps. *Energies*, 18(17), 4750. <https://doi.org/10.3390/en18174750>

14. International Atomic Energy Agency. (n.d.). *Energy indicators for sustainable development: Guidelines and methodologies*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1222_web.pdf

15. European Union. (n.d.). *Energy security assessment framework to support energy policy decisions*. https://ec.europa.eu/newsroom/know4pol/document.cfm?doc_id=64014

16. European Commission. (n.d.). *Energy union*. https://energy.ec.europa.eu/strategy/energy-union_en

17. McKinsey & Company. (n.d.). *From scenario planning to stress testing: The next step for energy companies*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/risk-and-resilience/our-insights/from-scenario-planning-to-stress-testing-the-next-step-for-energy-companies>

18. Podbregar, I., et al. (2020). International energy security risk index – Analysis of the methodological settings. *Energies*, 13(12), 3234. <https://doi.org/10.3390/en13123234>
19. APREN. (2024). *Security of EU electricity supply*. <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/acer-security-of-eu-electricity-supply-2024-compressed.pdf>
20. World Energy Council. (2022). *Trilemma Index 2022*. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf
21. European Environment Agency. (n.d.). *Primary and final energy consumption in the European Union*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/primary-and-final-energy-consumption>
22. Eurostat. (2024). *EU primary energy consumption decreased by 4% in 2023*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241220-1>
23. European Environment Agency. (n.d.). *Share of energy consumption from renewable sources in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from-renewable-sources>
24. International Renewable Energy Agency. (2022). *Renewable power generation costs in 2021*. <https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
25. European Union. (2023). *Workbook: Electricity and heat statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/f/fa/Workbook_Electricity_and_heat_statistics_edition_2023_REV.xlsx

26. Eurostat. (n.d.). *Energy efficiency statistics*.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_efficiency_statistics
27. Center on Global Energy Policy. (n.d.). *REPowerEU tracker*.
<https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/repowereu-tracker/>