



**Сучасні методи оцінки енергоефективності економіки: порівняльний
аналіз та перспективи впровадження в Україні**

Кишакевич Богдан Юрійович

д.е.н., професор, професор кафедри зовнішньоекономічної та митної діяльності, НУ «Львівська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5721-8543>

Настьошин Степан Євгенович

аспірант, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6259-7357>

Прийнято: 11.08.2024 | Опубліковано: 29.08.2024

***Анотація.** У статті розглядаються різні підходи до оцінки енергоефективності економіки в контексті глобальних викликів зменшення викидів парникових газів та підвищення енергетичної ефективності. Основна увага приділяється аналізу переваг та недоліків традиційних і сучасних методів, таких як DEA (Data Envelopment Analysis), стохастичний граничний аналіз, аналіз життєвого циклу (LCA), моделювання загальної рівноваги та декомпозиційний аналіз. У статті розглядаються конкретні методи, які можуть бути корисними для підвищення енергоефективності на рівні підприємств та національної економіки. Метод DEA виділяється своєю здатністю аналізувати ефективність використання ресурсів з урахуванням множинних вхідних та вихідних параметрів. Stochastic Frontier Analysis допомагає виявити резерви підвищення ефективності, що є особливо*



важливим для енергетично інтенсивних секторів. Метод LCA акцентує увагу на необхідності оцінки енергоефективності з урахуванням повного життєвого циклу продуктів або процесів. У статті наголошується на значенні використання моделювання загальної рівноваги для аналізу впливу енергетичної політики на економіку. Автори також зазначають, що декомпозиційний аналіз дозволяє детально вивчити фактори, які впливають на зміни енергоефективності. Стаття підкреслює важливість розвитку систем збору та аналізу даних для впровадження сучасних методів оцінки. Автори підкреслюють необхідність адаптації цих методів до українських умов, враховуючи специфіку національної економіки. Впровадження сучасних методів оцінки енергоефективності сприятиме оптимізації використання енергетичних ресурсів в Україні. Окремо акцентується на важливості міжнародної співпраці у сфері енергоефективності. Аналізуються останні наукові роботи, що систематизують методи оцінки енергоефективності та підкреслюють важливість адаптації цих методів до національних особливостей. Приділяється увага інтеграції з європейськими стандартами та досягненню цілей сталого розвитку. Окремо зазначаються виклики, пов'язані з обмеженою доступністю даних та необхідністю впровадження систем аналітики.

Ключові слова: енергоефективність, data envelopment analysis, stochastic frontier analysis, аналіз життєвого циклу, моделювання загальної рівноваги, відновлювані джерела енергії, енергетична політика.

Modern methods of evaluating energy efficiency of the economy: comparative analysis and prospects of implementation in Ukraine

Bohdan Kyshakevych

Doctor of Economics, professor, professor of the department of foreign economic and customs activity, Lviv Polytechnic National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5721-8543>



Stepan Nastoshyn

PhD student, Ivan Franko State Pedagogical University of Drohobych,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6259-7357>

Abstract. *The article considers different approaches to assessing the energy efficiency of the economy in the context of global challenges to reduce greenhouse gas emissions and improve energy efficiency. The main attention is paid to the analysis of the advantages and disadvantages of traditional and modern methods, such as DEA (Data Envelopment Analysis), stochastic marginal analysis, life cycle analysis (LCA), general equilibrium modeling and decomposition analysis. The article considers specific methods that can be useful for improving energy efficiency at the level of enterprises and the national economy. The DEA method stands out for its ability to analyze the efficiency of resource use, taking into account multiple input and output parameters. Stochastic Frontier Analysis helps to identify reserves for improving efficiency, which is especially important for energy-intensive sectors. The LCA method focuses on the need to assess energy efficiency taking into account the full life cycle of products or processes. The article notes the importance of using general equilibrium modeling to analyze the impact of energy policy on the economy. The authors also note that decomposition analysis allows for a detailed study of the factors influencing changes in energy efficiency. The article emphasizes the importance of developing data collection and analysis systems for the implementation of modern assessment methods. The authors emphasize the need to adapt these methods to Ukrainian conditions, taking into account the specifics of the national economy. The introduction of modern methods of energy efficiency assessment will contribute to the optimization of energy resource use in Ukraine. Special attention is paid to the importance of international cooperation in the field of energy efficiency. The latest scientific works are analyzed, systematizing the methods of energy efficiency assessment and emphasizing the importance of adapting these methods to national characteristics. Attention is paid to integration with European standards and achieving sustainable*



development goals. Challenges associated with limited data availability and the need to implement analytics systems are separately indicated.

Keywords: *energy efficiency, data envelopment analysis, stochastic frontier analysis, life cycle analysis, general equilibrium modeling, renewable energy sources, energy policy.*

Постановка проблеми. В умовах глобальних кліматичних змін та необхідності зменшення викидів парникових газів, ефективне використання енергетичних ресурсів стає одним із пріоритетів національної економічної політики. Україна, як одна з енергоємних економік Європи, стикається з викликами підвищення своєї енергоефективності та зниження залежності від викопного палива. Традиційні методи оцінки енергоефективності, хоч і дають загальну картину, не завжди відображають повну картину енергетичної ефективності різних секторів економіки. У зв'язку з цим виникає потреба в оновлених та більш комплексних методах оцінки, що дозволять детальніше аналізувати ефективність використання енергоресурсів.

Інтеграція сучасних методів, таких як DEA та стохастичний граничний аналіз, може надати більш точні оцінки ефективності використання енергії на мікро- та макроекономічному рівнях. Ці методи також сприятимуть ідентифікації резервів для підвищення енергоефективності в енергетично інтенсивних галузях. Особливо важливо врахувати перспективи впровадження відновлюваних джерел енергії, що є ключовим елементом переходу до "зеленої" економіки. Оскільки Україна прагне інтегруватися до Європейського Союзу, впровадження сучасних методів оцінки енергоефективності відповідатиме європейським стандартам та сприятиме досягненню цілей сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні кілька років було опубліковано цілу низку наукових робіт, у яких автори намагалися систематизувати методи оцінювання ефективності використання енергії,



базуючись на економічних принципах виробництва. Серед них слід виокремити роботи М. Filippini, L. Hunt [1], X. Bai, K. Wang, T. Tran, M. Sadiq, L. Trung, K. Khudoykulov [2], H. Sun, A. Kporsu, F. Taghizadeh-Hesary, B. Edziah [3], C. Sun, X. Yan, L. Zhao [4], A. Camanho, M. Silva, F. Piran, D. Lacerda [5], Kyshakevych, B., Maksyshko, N., Voronchak, I., & Nastoshyn, S. [6], M. Galeotti, S. Salini, E. Verdolini [7], W. Shah, G. Hao, H. Yan [8]. У статті [9] J. Payne, H. Truong, L. Chu, B. Doğan, S. Ghosh розглянули вплив економічної складності та енергетичної безпеки на цілу низку показників енергоефективності. N. Canh, C. Schinckus, S. Thanh, F. Chong у роботі [10] проаналізували різні показники енергоефективності у контексті впливу тіньової економіки на енергоспоживання. Дослідження X. He, Y. Yu, S. Jiang [11], Б. Кишакевич [12], M. Hossin, D. Alemzero, R. Wang, M. Kamruzzaman, M. Mhlanga [13], M. Hossin, D. Alemzero, R. Wang, M. Kamruzzaman, M. Mhlanga [14], M. Gorus, E. Karagol [15] теж присвячені висвітленню різних проблемних аспектів вимірювання енергоефективності на макрорівні.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність значної кількості публікацій, присвячених проблемі оцінки енергоефективності, ці дослідження не забезпечують глибокого аналізу теоретичних основ енергоефективності. У них не надано точного визначення цього поняття та не продемонстровано чітких методів його емпіричної оцінки за допомогою параметричних підходів. Особливої уваги потребує також дослідження перспектив впровадження в Україні західних методів оцінки енергоефективності економіки, таких як параметричні моделі, моделей аналізу життєвого циклу та ідентифікація факторів, які перешкоджають цьому.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даного дослідження та порівняння сучасних методів оцінки енергоефективності економіки, визначення їх переваг і недоліків, а також обґрунтування перспектив впровадження цих методів в Україні для підвищення



енергоефективності національної економіки та досягнення міжнародних стандартів.

Досягнення мети даного дослідження передбачає вирішення наступних завдань:

1. Проведення порівняльного аналізу традиційних і сучасних методів оцінки енергоефективності, таких як DEA, Stochastic Frontier Analysis, та аналіз життєвого циклу (LCA).
2. Визначення перспективи впровадження сучасних методів оцінки енергоефективності в Україні на рівні галузей та економіки загалом.
3. Оцінка переваги та недоліки кожного методу в контексті їхньої застосовності до української економіки.
4. Визначення ключових аспектів, пов'язаних з впровадженням відновлюваних джерел енергії для зниження залежності від викопного палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. На сьогодні існують різні концепції енергоефективності економіки, які базуються на різних підходах до оцінки та інтерпретації ефективності використання енергетичних ресурсів у процесі економічної діяльності. В технологічному підході енергоефективність визначається як результат впровадження новітніх технологій та обладнання, які дозволяють зменшити кількість енергії, необхідної для виробництва товарів і послуг [16]. При економічному підході Енергоефективність розглядається з точки зору економічної вигоди від скорочення енергоспоживання. Вона виражається через зниження витрат на енергію на одиницю ВВП або на виробництво товарів та послуг [17]. При екологічному підході енергоефективність розглядається як інструмент зменшення негативного впливу на навколишнє середовище через скорочення викидів парникових газів та зниження використання викопних видів палива [18]. Інтеграційний або міждисциплінарний підхід енергоефективність розглядає як комплексний показник, що враховує економічні, технологічні та екологічні аспекти використання енергії [19]. Проте ключовим елементом

цих підходів є використовувані методи оцінки енергоефективності. У таблиці 1 зроблено порівняння методів оцінки енергоефективності економіки, їх переваг та недоліків.

Таблиця 1

Порівняння методів оцінки енергоефективності економіки, їх переваг та недоліків

Метод	Опис	Переваги	Недоліки
Індикатори енергоефективності	Вимірювання енергоемності ВВП та енергоспоживання на душу населення.	Простота, доступність даних, придатність для міжнародних порівнянь.	Не враховує структурні зміни в економіці та технологічний прогрес.
Метод оцінки через інтенсивність викидів CO ₂	Оцінка енергоефективності через відношення обсягів викидів CO ₂ до економічної активності.	Дозволяє оцінити ефективність зменшення викидів при економічному зростанні.	Зосереджений на екологічних аспектах, може не відображати повну енергоефективність.
Метод DEA (Data Envelopment Analysis)	Оцінка ефективності використання ресурсів шляхом порівняння входів та виходів.	Глибокий аналіз енергоефективності на основі відносної ефективності.	Вимагає значних обсягів даних, складний для реалізації.
Метод граничного аналізу продуктивності (Stochastic Frontier Analysis)	Визначає максимальну продуктивність за даних обсягів енергоресурсів.	Дає можливість виявити резерви для підвищення ефективності.	Може бути складним для інтерпретації та потребує складних моделей.
Life Cycle Analysis, LCA	Аналіз енергоспоживання на різних етапах життєвого циклу продукту або процесу.	Деталізований аналіз на рівні продуктів або процесів.	Трудомісткий та складний для виконання, особливо на макрорівні.
Моделювання загальної рівноваги (Computable General Equilibrium, CGE)	Моделює вплив енергетичної політики на економіку та енергоефективність.	Комплексний підхід, враховує взаємозв'язки в економіці.	Висока складність моделювання, потребує великих обсягів даних.
Метод декомпозиційного аналізу (Decomposition Analysis)	Аналізує зміни в енергоефективності через структурні та технологічні зміни.	Допомагає виявити внесок різних факторів у зміни енергоефективності.	Може не враховувати всі фактори, що впливають на енергоефективність.

До найпоширеніших індикаторів енергоефективності економіки можна віднести:

- 
- 
1. Енергоемність (Energy Intensity - EI). Цей індикатор показує, скільки енергії використовується для виробництва одиниці валового внутрішнього продукту (ВВП).

$$EI = \frac{\text{Використання енергії (MJ)}}{\text{ВВП (PPP в доларах США, 2017)}} \quad (1)$$

2. Споживання енергії на душу населення (Energy Consumption per Capita - C_ENER_PC). Цей індикатор показує кількість енергії, споживаної в середньому однією людиною.

$$C_ENER_PC = \frac{\text{Сукупне споживання енергії (Mtoe)}}{\text{Чисельність населення}} \quad (2)$$

3. Споживання електроенергії на душу населення (Electricity Consumption per Capita - ELS). Цей показник визначає кількість електроенергії, яка споживається однією особою.

$$ELS = \frac{\text{Загальне споживання електроенергії (GWh)}}{\text{Чисельність населення}} \quad (3)$$

4. Інтенсивність викидів вуглекислого газу (CO2 Intensity - CO_GDP) - відображає кількість викидів CO2 на одиницю ВВП.

$$CO_GDP = \frac{\text{Викиди CO}_2 \text{ (кг)}}{\text{ВВП (PPP в доларах США)}} \quad (4)$$

5. Первинне енергоспоживання (Primary Energy Consumption - C_ENER) - вимірює загальну кількість первинної енергії, що споживається в країні.

$$C_ENER = \text{Сукупне споживання первинної енергії (Mtoe)} \quad (5)$$

6. Споживання газу на душу населення (Gas Consumption per Capita - GAS_PC) - відображає середнє споживання газу на одну особу.

$$GAS_PC = \frac{\text{Сукупне споживання газу (TJ)}}{\text{Чисельність населення}} \quad (6)$$

7. Споживання твердих енергоресурсів на душу населення (Solid Fossil Energy Consumption per Capita - S_PC) - оцінює кількість твердих енергоресурсів, що споживаються на одну особу.

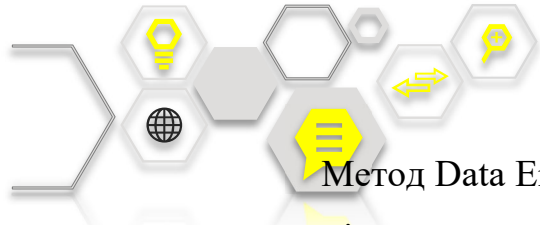


$$S_{PC} = \frac{\text{Сукупне споживання твердих енергоресурсів (кТ)}}{\text{Чисельність населення}} \quad (7)$$

Суть методу оцінки енергоефективності через інтенсивність викидів CO_2 полягає в тому, що енергоефективність економіки вимірюється через кількість викидів вуглекислого газу (CO_2), що утворюються під час виробництва одиниці економічного продукту (наприклад, ВВП):

$$CO_GDP = \frac{\text{Викиди } \text{CO}_2 \text{ (кг)}}{\text{ВВП (PPP в доларах США)}} \quad (8)$$

Цей метод дозволяє оцінити, наскільки ефективно економіка використовує енергію з погляду екологічного впливу, оскільки зменшення викидів CO_2 часто означає більш ефективне використання енергетичних ресурсів та перехід на більш чисті джерела енергії. Цей показник дозволяє оцінити, скільки CO_2 виділяється під час виробництва однієї одиниці ВВП. Чим нижчий цей показник, тим менш інтенсивною є економіка у викидах CO_2 і тим вищою вважається її енергоефективність. Цей метод враховує не тільки кількість використаної енергії, а й кількість викидів парникових газів, що є важливим аспектом у контексті боротьби зі змінами клімату. Показник CO_GDP дозволяє порівняти країни або сектори економіки щодо їх енергетичної ефективності на основі екологічних критеріїв. Наприклад, навіть якщо країна використовує багато енергії, вона може мати низький рівень викидів CO_2 , що свідчить про використання чистих джерел енергії (сонячної, вітрової тощо). Високий рівень інтенсивності викидів CO_2 вказує на залежність від вуглецево-інтенсивних джерел енергії, таких як вугілля, нафта чи природний газ. Це дає підстави для переходу на відновлювані джерела енергії або впровадження більш ефективних технологій. Метод інтенсивності викидів CO_2 використовується для аналізу енергоефективності на рівні країн, галузей промисловості чи компаній. Він також є важливим інструментом у формуванні політики зниження викидів парникових газів і досягнення цілей сталого розвитку [14].



Метод Data Envelopment Analysis (DEA) для оцінки енергоефективності

економіки є не параметричним методом, що дозволяє аналізувати ефективність використання ресурсів (енергії) з урахуванням множинних вхідних і вихідних параметрів. DEA базується на лінійному програмуванні та використовується для оцінки ефективності виробничих одиниць (Decision Making Units, DMU), таких як підприємства, галузі або навіть країни. DEA порівнює енергоефективність різних DMU шляхом побудови ефективної "оболонки" (envelope) або межі виробничих можливостей, на якій знаходяться найефективніші одиниці. Усі інші одиниці порівнюються з цією межею, і оцінюється, наскільки вони відхиляються від неї. Практична реалізація методу DEA відбувається у кілька етапів:

1. **Вибір входів та виходів:** Спочатку потрібно визначити, які показники будуть використовуватися як вхідні (наприклад, споживання енергії, капітал, робоча сила) та вихідні (наприклад, ВВП, обсяг виробництва, екологічні показники).
2. **Оцінка ефективності:** Для кожної DMU будується співвідношення "входи/виходи". Використовуючи лінійне програмування, DEA знаходить найкращі можливі співвідношення, що утворюють межу ефективності.
3. **Порівняння:** Кожна DMU порівнюється з межею ефективності. Якщо одиниця знаходиться на межі, її ефективність дорівнює 1 (або 100%). Якщо одиниця знаходиться нижче межі, її ефективність буде менше 1.
4. **Інтерпретація результатів:** Одиниці, що є неефективними, можуть бути проаналізовані, щоб виявити, як можна покращити їх енергоефективність — наприклад, за рахунок зменшення споживання енергії або збільшення виходів (продуктивності).

DEA метод розв'язує задачу лінійного програмування для кожної DMU, щоб максимізувати співвідношення виходів до входів при обмеженнях, що інші DMU не мають співвідношення вище цього. Цей метод дозволяє одночасно враховувати декілька вхідних та вихідних параметрів, що робить



його ідеальним для оцінки комплексних систем, таких як економіка. На відміну від параметричних методів, DEA не потребує попереднього вибору функції, що описує зв'язок між вхідними та вихідними показниками. DEA дозволяє порівнювати різні DMU за їх відносною ефективністю, навіть якщо вони мають різні структури вхідних та вихідних показників [8].

Stochastic Frontier Analysis (SFA) — це економетричний метод, який використовується для оцінки технічної та економічної ефективності виробничих одиниць (підприємств, галузей, країн) за допомогою статистичних моделей, що враховують випадкові помилки та неефективність. Суть методу полягає в тому, що виробнича функція представляється у вигляді «фронтиру» (межі), яка визначає максимально можливий обсяг виробництва для заданого рівня ресурсів, при цьому допускаються випадкові відхилення та неефективність в реальних результатах. SFA передбачає, що фактичний рівень виробництва або економічного результату складається з наступних компонентів:

- **Систематична частина (стохастична фронтрна функція):** Ця частина моделі описує ефективну виробничу функцію або економічну межу, яка визначає максимально можливий результат при даному рівні ресурсів (входів).
- **Неефективність (технічна неефективність):** Відхилення від цієї межі, що пов'язане з неефективністю управління або організаційних процесів.
- **Випадкові шоки (випадкові похибки):** Ця частина відображає зовнішні фактори, що впливають на результат (помилки вимірювань, природні катастрофи, непередбачувані зміни в ринковому середовищі).

У SFA методі задається виробнича функція:

$$Y_i = f(X_i) \cdot e^{(v_i - u_i)} \quad (9)$$

де:

Y_i — фактичний випуск або продуктивність виробничої одиниці i ,



$f(X_i)$ — виробнича функція, що залежить від набору вхідних ресурсів.

v_i — випадкова помилка (стохастичний компонент), що моделює зовнішні шоки та коливається навколо нуля,

u_i — неефективність одиниці i , яка є завжди не від'ємною ($u_i \geq 0$) [14].

Виробнича межа представляє найвищий можливий рівень продуктивності за певних умов. Ті одиниці, які досягають цього рівня, вважаються технічно ефективними. Важливий аспект SFA полягає в тому, що вона розрізняє випадкові помилки (позитивні чи негативні) та неефективність. Випадкові помилки можуть відображати такі фактори, як зміни попиту, погодні умови або інші неконтрольовані впливи, тоді як неефективність є результатом внутрішніх організаційних або технічних проблем. Метод дозволяє кількісно оцінити рівень технічної неефективності кожної одиниці виробництва, що відхиляється від виробничої межі. Таким чином, можна ідентифікувати, які одиниці працюють нижче свого потенціалу та на скільки. Неефективність u_i зазвичай моделюється як половина нормального розподілу або як інші асиметричні розподіли. Це дозволяє SFA визначати ступінь відхилення продуктивності вниз від границі.

Life Cycle Analysis (LCA) або аналіз життєвого циклу — це метод оцінки впливу продукту, послуги або процесу на довкілля та енергоефективність протягом всього його життєвого циклу. Суть LCA полягає в тому, що всі етапи життєвого циклу аналізованого об'єкта, від видобутку ресурсів до його утилізації, розглядаються комплексно для того, щоб визначити загальну кількість спожитої енергії, викидів, та інші екологічні наслідки. Це дозволяє оцінити енергоефективність продукту чи процесу з урахуванням його повного життєвого циклу. Для оцінки енергоефективності економіки за допомогою методу Life Cycle Analysis (LCA) необхідно адаптувати його до макrorівня, оскільки цей метод зазвичай використовується для аналізу продуктів або процесів на мікрорівні. Використання LCA для оцінки енергоефективності економіки потребує



розгляду життєвого циклу основних галузей економіки або видів економічної діяльності, враховуючи всі етапи — від видобутку ресурсів до кінцевого споживання та утилізації. Можна застосувати наступні кроки для оцінки енергоефективності економіки на основі LCA:

1. Визначення цілей і меж аналізу:

- Спочатку потрібно визначити, які сектори або види економічної діяльності будуть включені в аналіз. Наприклад, можна досліджувати енергоефективність виробництва електроенергії, транспорту, будівництва, промисловості тощо.
- Встановлюються межі аналізу: чи буде він обмежений національними кордонами, чи враховуватимуться також імпортовані товари та послуги.

2. Збір даних на всіх етапах життєвого циклу:

- Необхідно зібрати дані про енергоспоживання та викиди для кожного етапу життєвого циклу окремих секторів економіки. Наприклад, для енергетичного сектору це може включати видобуток палива, виробництво електроенергії, її транспортування та споживання.

3. Інвентаризація життєвого циклу на рівні економіки (Life Cycle Inventory - LCI):

- Потрібно створити інвентаризацію всіх матеріальних та енергетичних потоків на рівні економіки. Це включає облік енергії, що надходить до різних секторів, та енергії, що споживається на кожному етапі життєвого циклу економічної діяльності.
- Збір інформації про первинні ресурси, виробництво енергії, транспортування, використання та утилізацію продуктів, що є частиною економіки.

4. Оцінка впливу життєвого циклу (Life Cycle Impact Assessment - LCIA):



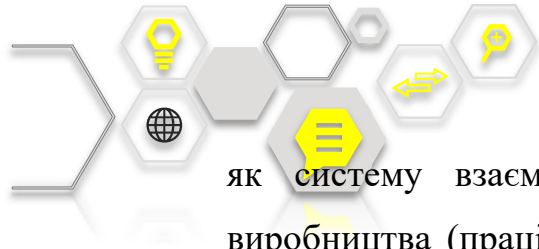
- Оцінюється вплив енергоспоживання на енергоефективність економіки та довкілля. Наприклад, можна аналізувати, який сектор має найбільший внесок у споживання енергії та викиди CO₂.
- Визначаються ключові сфери з найбільшими енергетичними втратами або найбільшим потенціалом для підвищення ефективності.

5. Інтерпретація та рекомендації:

- Аналіз результатів для визначення основних секторів, які можуть бути оптимізовані для підвищення енергоефективності. Наприклад, можуть бути виявлені сектори, де енергетичні втрати є найбільшими, або де можна знизити споживання енергії через модернізацію технологій.

До переваг LCA для оцінки енергоефективності економіки можна віднести те, що LCA дозволяє врахувати всі етапи життєвого циклу, що дозволяє визначити, які саме етапи мають найбільший вплив на енергоефективність економіки. За допомогою LCA можна виявити найбільш енергоємні процеси та розробити стратегії для зниження їх енергетичних витрат. LCA допомагає поєднати оцінку енергоефективності з екологічною стійкістю, що дозволяє країнам розробляти політику, орієнтовану на одночасне зниження енергоспоживання та зменшення негативного впливу на довкілля.

Моделювання загальної рівноваги (Computable General Equilibrium, CGE) — це економічний метод моделювання, який використовується для аналізу взаємодії між різними секторами економіки та оцінки впливу різних політик чи шоків на економічну рівновагу в цілому. У контексті енергоефективності економіки CGE дозволяє моделювати, як зміни в енергетичній політиці або енергоефективності впливають на різні економічні змінні (виробництво, споживання, ціни, зайнятість, експорт, імпорт тощо) та взаємодії між секторами. CGE-моделі описують економіку



як систему взаємопов'язаних ринків для товарів, послуг і факторів виробництва (праці, капіталу, землі). Вони базуються на мікроекономічних принципах, таких як максимізація корисності для споживачів і максимізація прибутку для виробників, та використовують рівняння для опису рівноваги на ринках цих товарів і факторів виробництва. Ця рівновага досягається шляхом коригування цін та кількостей, щоб балансувати попит і пропозицію на всіх ринках одночасно.

Кожен сектор економіки представлений виробничими функціями, що визначають, як фактори виробництва (праця, капітал, енергія) поєднуються для створення продукції. У контексті енергоефективності енергія виступає як важливий фактор, і підвищення енергоефективності моделюється як зменшення потреби в енергетичних ресурсах для досягнення того самого обсягу виробництва. Споживачі представлені в моделі через функції попиту на товари та послуги, які залежать від їх доходів і цін. Підвищення енергоефективності може призвести до зміни структури попиту в економіці через зміну цін на товари та послуги. У CGE-моделях враховується взаємодія з іншими країнами через експорт та імпорт.

Пропонується наступний перелік основних етапів використання CGE у контексті оцінки енергоефективності:

1. **Визначення базової моделі.** Будується базова модель економіки, яка включає всі основні сектори (промисловість, енергетику, сільське господарство, транспорт тощо), а також ринки праці, капіталу та землі. Модель включає виробничі функції для кожного сектора, де енергія є одним з вхідних факторів виробництва.
2. **Введення політик чи шоків.** Модель використовується для моделювання певної зміни або шоку, пов'язаного з енергоефективністю. Це може бути впровадження політики енергоефективності, зміни у використанні енергетичних ресурсів, зміни цін на енергію, інвестиції в енергозбереження тощо.



3. **Аналіз взаємодії між секторами.** CGE моделює, як підвищення енергоефективності в одному секторі впливає на інші сектори економіки через зміни у витратах на енергію, продуктивності, ціни на товари та послуги, а також на доходи домогосподарств.

4. **Оцінка загального впливу.** Після того як модель адаптується до зміни політики чи зовнішніх умов, можна оцінити загальний вплив на економіку. Це включає аналіз змін у валовому внутрішньому продукті (ВВП), рівнях споживання енергії, зайнятості, торгівлі та екологічних показниках (наприклад, викидах CO₂).

До переваг CGE-моделювання для аналізу енергоефективності можна віднести можливість врахування складних взаємодій між усіма секторами економіки, що є особливо корисним у випадку аналізу енергоефективності, оскільки зміни в енергетичному секторі впливають на всі інші сектори.

Метод декомпозиційного аналізу (Decomposition Analysis) є статистичним методом, який використовується для розкладання змін у загальних показниках на складові частини, щоб зрозуміти вплив різних факторів на ці зміни. У контексті оцінки енергоефективності економіки, декомпозиційний аналіз дозволяє виділити внесок різних факторів у зміни в енергоспоживанні та енергоефективності на рівні країни, сектора або підприємства. Суть методу декомпозиційного аналізу полягає в тому, що загальна зміна енергоефективності або енергоспоживання розкладається на внесок різних факторів. Це може бути зміна структури економіки, зміна інтенсивності використання енергії в секторах, зміни технологій, економічне зростання, демографічні зміни та інші фактори.

Для практичної реалізації цього підходу при оцінювання енергоефективності доцільно використовувати наступний алгоритм:

1. **Вибір показників.** Наприклад, це можуть бути загальне енергоспоживання, енергоінтенсивність, викиди CO₂, обсяг виробництва тощо.



2. Розкладання змін на складові. Використовуючи метод декомпозиції, зміни у вибраних показниках розкладаються на складові частини, які представляють внесок окремих факторів. Наприклад, зміна енергоспоживання може бути розкладена на:

- **Ефект активності (activity effect):** зміни, пов'язані з економічним зростанням або змінами у виробництві.
- **Структурний ефект (structural effect):** зміни, пов'язані зі змінами у структурі економіки, наприклад, зростання частки секторів з низьким або високим споживанням енергії.
- **Ефект інтенсивності енергії (energy intensity effect):** зміни, пов'язані з підвищенням або зниженням ефективності використання енергії в різних секторах.

3. Аналіз результатів – ідентифікація факторів, які мали найбільший вплив на зміни енергоефективності, і обґрунтування їх позитивного або негативного впливу на енергоефективність.

Якщо через E позначити загальне енергоспоживання, яке залежить від економічної активності A , структури економіки S та інтенсивності енергії I , тоді загальна зміна енергоспоживання може бути розкладена за формулою:

$$\Delta E = \Delta A + \Delta S + \Delta I \quad (10)$$

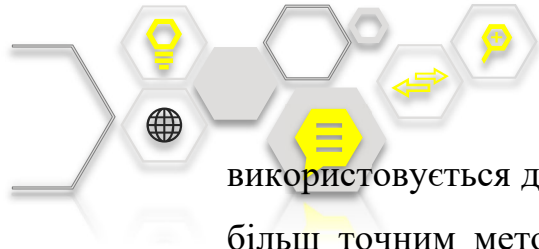
де:

ΔA — зміна енергоспоживання, викликана змінами в економічній активності (наприклад, зростанням ВВП),

ΔS — зміна енергоспоживання через структурні зміни (перехід від енергоємних до менш енергоємних галузей),

ΔI — зміна енергоспоживання через зміну інтенсивності використання енергії (покращення технологій або зміни в енергоефективності).

Загалом виділяють такі види декомпозиційного аналізу, як індексний метод Ласпереса (Laspeyres Index Decomposition) та метод Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI). Індексний метод Ласпереса базується на фіксованих базових показниках і використовує їх для оцінки змін. Він часто



використовується для аналізу, оскільки легко інтерпретується. Метод LMDI є більш точним методом декомпозиції, оскільки він розглядає логарифмічні середні зміни у вхідних факторах, що дає більш детальний і точний аналіз змін енергоефективності.

Висновки. В Україні використовуються переважно традиційні методи оцінки енергоефективності, такі як індикатори енергоємності ВВП та споживання енергії на душу населення, інтенсивність викидів CO₂ та споживання енергії в промисловості. Ці методи застосовуються на макроекономічному рівні для оцінки загальної енергоефективності економіки та окремих секторів, зокрема, промисловості, транспорту і комунального господарства.

Стосовно інших підходів слід відзначити, що вони теж мають значний потенціал для їх практичної реалізації в Україні. Так, DEA метод ще не широко застосовується в Україні для оцінки енергоефективності, однак він може стати корисним для аналізу ефективності використання енергії на рівні підприємств або секторів. Перспективи впровадження залежать від доступності даних та впровадження систем аналітики для порівняльного аналізу енерговитрат. Stochastic Frontier Analysis має потенціал для застосування в Україні, особливо для ідентифікації резервів підвищення ефективності у енергетично інтенсивних секторах, таких як металургія та хімічна промисловість. Life Cycle Analysis хоч ще не набув значного поширення в Україні, він має великий потенціал для впровадження в галузях, що прагнуть підвищити екологічну відповідальність та зменшити вуглецевий слід своїх продуктів. Моделювання загальної рівноваги має великий потенціал для аналізу впливу енергетичної політики на економіку України. Цей метод може бути корисним для моделювання майбутніх сценаріїв зниження залежності від викопного палива і переходу до відновлюваних джерел енергії. Декомпозиційний аналіз може бути впроваджений для аналізу змін у енергоефективності на основі структурних змін в економіці та



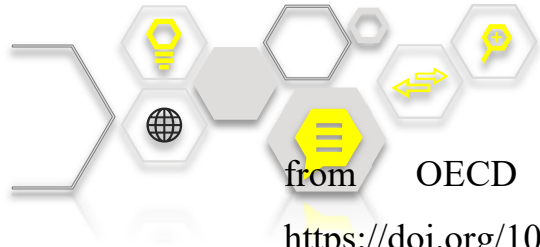
впливу технологічного прогресу. Це може бути корисно для урядових органів при оцінці ефективності енергетичних реформ.

Таким чином, Україна має потенціал для розширення спектра методів оцінки енергоефективності. Для цього необхідно розвивати систему збору та аналізу даних на рівні підприємств та секторів, впроваджувати сучасні аналітичні інструменти і підтримувати міжнародне співробітництво у сфері енергоефективності.

Список використаних джерел

1. Filippini M., Hunt L., Measurement of energy efficiency based on economic foundations. *Energy Economics*. 2015. Vol. 52. Supplement 1. 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.023>.
2. Bai X., Wang K., Tran T., Sadiq M., Trung L., Khudoykulov K. Measuring China's green economic recovery and energy environment sustainability: Econometric analysis of sustainable development goals. *Economic Analysis and Policy*. 2022. Vol. 75. 768-779. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.07.005>.
3. Sun H., Kporsu A., Taghizadeh-Hesary F., Edziah B. Estimating environmental efficiency and convergence: 1980 to 2016. *Energy*. 2020. Vol. 208. 118224. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118224>.
4. Sun C., Yan X., Zhao L.. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water–energy–food nexus in China. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. 105151. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105151>.
5. Camanho A., Silva M., Piran F., Lacerda D.. A literature review of economic efficiency assessments using Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 315. Issue 1. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.027>.
6. Kyshakevych B., Maksyshko N., Voronchak I., Nastoshyn S. Ecological and economic determinants of energy efficiency in European countries. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26(8). 140-155. doi: 10.48077/scihor8.2023.140.

- 
- 
7. Galeotti M., S. Salini, E. Verdolini, Measuring environmental policy stringency: Approaches, validity, and impact on environmental innovation and energy efficiency. *Energy Policy*. 2020. Vol. 136. 111052. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111052>.
 8. Shah W.U.H., Hao G., Yan H. *et al.* Energy efficiency evaluation, changing trends and determinants of energy productivity growth across South Asian countries: SBM-DEA and Malmquist approach. *Environ Sci Pollut Res*. 2023. Vol. 30. 19890–19906. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23484-w>
 9. Payne J., Truong H., Chu L., Doğan B., Ghosh S. The effect of economic complexity and energy security on measures of energy efficiency: Evidence from panel quantile analysis. *Energy Policy*. 2023. Vol. 177. 113547. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113547>.
 10. Canh N., Schinckus C., Thanh S., Chong F. The determinants of the energy consumption: A shadow economy-based perspective. *Energy*. 2021. Vol. 225. 120210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120210>.
 11. He X., Yu Y., Jiang S. City centrality, population density and energy efficiency. *Energy Economics*. 2023. Vol. 117. 106436. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106436>.
 12. Кишакевич Б.Ю. Використання рейтингових моделей в ризик-менеджменті. *Вісник Львівської державної фінансової академії*. 2009. 16. 160–169.
 13. Hossin M., Alemzero D., Wang R., Kamruzzaman M., Mhlanga M. Examining artificial intelligence and energy efficiency in the MENA region: The dual approach of DEA and SFA. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. 4984-4994. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.113>.
 14. Alnafrh I. Efficiency evaluation of BRICS's national innovation systems based on bias-corrected network data envelopment analysis. *J Innov Entrep*. 2021. Vol. 10. <https://doi.org/10.1186/s13731-021-00159-3>.
 15. Gorus M., Karagol E. Reactions of energy intensity, energy efficiency, and activity indexes to income and energy price changes: The panel data evidence



from OECD countries. *Energy*. 2021. Vol. 254. 124281.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124281>.

16. Jaffe, A. B., Stavins, R. N. The energy-efficiency gap: What does it mean? *Energy Policy*. 1994. Vol. 22(10). 804-810.
17. Sovacool, B. K., Griffiths, S. Culture and low-carbon energy transitions. *Nature Sustainability*. 2020. 3(10). 852-864.
18. IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022.
19. Zhao X., Wang S., Su Y. A comprehensive review of energy efficiency policies for the industrial sector in major countries. *Energy Strategy Reviews*. 2022. 41. 100826.