

Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292. Ефективна економіка. 2025. № 8.

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.8.17>

УДК 338.32:621.311.243

О. М. Теліженко,

*д. е. н., професор, головний науковий співробітник кафедри економіки,
підприємництва та бізнес-адміністрування,
Сумський державний університет*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9864-4098>

О. В. Кубатко,

*к. е. н., доцент, старший викладач кафедри економіки, підприємництва та
бізнес-адміністрування, Сумський державний університет*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6869-7727>

Г. С. Трипольська,

*к. е. н., старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу
економіки енергетики та клімату,*

ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-7036>

Д. О. Смоленніков,

*к. е. н., доцент, доцент кафедри управління ім. Олега Балацького,
Сумський державний університет*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8418-051X>

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ: МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ОХОПЛЕННЯ ДАНИХ¹

¹ Стаття підготовлено в межах виконання наукового проєкту «Розроблення економічних механізмів підвищення енергоефективності та сталого розвитку відновлюваної енергетики в домогосподарствах України» (№ д/р 0122U001233), що фінансується Національним фондом досліджень України.

O. Telizhenko,

Doctor of Economic Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Economics, Entrepreneurship and Business Administration, Sumy State University

O. Kubatko,

PhD in Economics, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Economics, Entrepreneurship and Business Administration, Sumy State University

G. Trypolska,

PhD in Economics, Senior Researcher, Leading Researcher, Department of Energy and Climate Economics, State Institution

«Institute of Economics and Forecasting of the NAS of Ukraine»

D. Smolennikov,

PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management named after Oleg Balatsky, Sumy State University

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF LOCAL DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS: DATA ENVELOPMENT ANALYSIS MODEL

В статті обґрунтовані методичні та практичні підходи до оцінювання енергетичної ефективності локальних мереж розподіленої генерації об'єктів критичної інфраструктури, житлового сектору/домогосподарств на основі сонячних електростанцій із застосуванням моделі аналізу охоплення даних – Data envelopment analysis (DEA). Показано, що визначення енергоефективності локальної мережі, що містить розподілену генерацію, в тому числі з відновлюваними джерелами, на основі моделі DEA формалізується в оцінку ефективності трансформаційного процесу в системі «вхід – вихід» мережі за умови відповідності її основним експлуатаційним обмеженням. Запропоновано набір вхідних і вихідних показників/індексів та підходи до оцінки їх вагового значення. На прикладі реальних проєктів будівництва сонячних електростанцій доведено

коректність застосування моделі DEA для оцінювання впливу на децентралізацію та декарбонізацію житлового сектору/домогосподарств.

The article substantiates methodological and practical approaches to assessing the energy efficiency of local distributed generation networks of critical infrastructure facilities, the residential sector/households based on solar power plants using the Data Envelopment Analysis (DEA) model. It is shown that determining the energy efficiency of a local network containing distributed generation, including renewable sources, based on the DEA model is formalized into an assessment of the efficiency of the transformation process in the «input – output» system of the network, if it complies with its main operational constraints. The «input – output» system is characterized by a set of different indicators: energy, economic, environmental, operational, management, etc. In the first approximation, it is proposed to divide them into two categories – basic elements and operational requirements/constraints. The set of indicators/indices for assessing the energy efficiency of local network projects can be different. This depends both on the structure of the network itself and on the current technical, technological and organizational and economic tasks for which it is designed. When forming a set of indices, the following principles must be observed: indices must be representative; indices must reflect one aspect of the input or output of a local network containing distributed generation.

It is proposed to determine the weight vectors of the group of input and output indices in the model by the expert method. Although it is traditionally believed that the expert method is used in cases where it is difficult or impossible to use objective methods, or when the latter give less accurate and reliable results, or their implementation is associated with significant costs, with regard to local network projects with distributed generation it is important to take into account the peculiarities of their operation in specific settlements. And this, in turn, may affect the assessment of the weight value of a particular input/output indicator in their overall structure. The correctness of the application of the DEA model is proven

on the example of real solar power plant construction projects to assess the impact of higher energy efficiency on decentralization and decarbonization of the residential sector/households.

Ключові слова: *локальні мережі, розподілена генерація, сонячні електростанції, енергетична ефективність, відносна оцінка, домогосподарство.*

Keywords: *local networks, distributed generation, solar power plants, energy efficiency, relative assessment, household.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Впровадження систем розподіленої генерації в Україні обумовлене, перш за все, необхідністю розосередження генерації для посилення стійкості енергосистем [1]. Розв'язання проблем заміщення генеруючих потужностей в об'єднаній енергетичній системі України відповідно до вимог Директиви [2], яку Україна має запровадити в рамках Енергетичного Співтовариства [3] полягає у впровадженні розподіленої генерації з гарантованою потужністю, а також модернізації мережевої інфраструктури систем передачі і розподілу електричної енергії. При цьому, у зазначеній Директиві [2] термін «розподілена генерація» означає генеруючі установки, приєднані до систем розподілу. Це визначення є надзвичайно важливим, оскільки воно не тільки характеризує розподілену генерацію як локальну мережу/систему, а впливає на вибір/розробку методичних підходів до оцінки енерго-економічної ефективності відповідних проєктів.

У рекомендаціях круглого столу, проведеного Асоціацією малих міст України в межах дослідження «Забезпечення енергетичної стійкості громад шляхом впровадження розподіленої генерації в Україні» [4] вказується на необхідність подальшого впровадження розподіленої генерації у громадах для житлового сектору/домогосподарств на основі відновлюваних джерел (ВДЕ-генерації), що відповідає завданням Національного плану дій з

відновлюваної енергетики на період до 2030 року [5], Національного плану дій з енергоефективності на період до 2030 року [6] та актуалізує задачу розробки методичних підходів до техніко-економічного обґрунтування проєктів розподіленої ВДЕ-генерації в контексті декарбонізації національної економіки.

Необхідно зазначити, що у відповідності до [7], а саме Додатку IX «Аналіз витрат і вигід. Частина 2» аналіз витрат і вигід ґрунтується на описі запланованої установки та установки, з якою її порівнюють, з урахуванням потужності, виду палива, запланованого використання, планової кількості годин експлуатації на рік, місця розташування, а також попиту на енергію. Порівняння повинно охоплювати інфраструктурні витрати на заплановану установку й установку для порівняння. В роботі [8] запропоновано здійснювати опис енергетичних процесів з урахуванням «... дії різних причин (факторів) виникнення додаткових втрат електроенергії в локальних енергетичних системах, зокрема, обумовлених різними режимами роботи генераторів та навантажень (спектрами напруги та струму), ... що визначається технологічними факторами роботи системи».

Очевидно, що оцінка енергоефективності локальних мереж житлового сектору/домогосподарств передбачає аналіз споживання електроенергії та виявлення можливостей для її оптимізації, а також включає в себе визначення показників якості електроенергії, виявлення втрат та впровадження заходів щодо їх зниження. Соціально-економічна та просторова економетрія також впливають на інвестиційні рішення щодо розгортання фотоелектричних систем. Так автори роботи [9] визначили три соціально-економічні фактори, що впливають на інвестиційні рішення приватних домогосподарств у Німеччині щодо фотоелектричних систем – якість життя, урбанізація та законодавство.

В роботі [10] вказується, що хоча використання таких показників як термін окупності, нормалізована вартість електроенергії ($LCOE$), чиста приведена вартість (NPV) та рентабельність інвестицій легко обчислити та

інтерпретувати, їх використання при оцінюванні продуктивності, наприклад, дахових сонячних систем обмежує порівняння між окремими проектами встановлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи переваги та проблеми впровадження децентралізації і декарбонізації енергетичних систем, автори [11] наголошують, що ці складні системи містять численні підсистеми, які мають суперечливі, навіть антагоністичні цілі. Саме тому моделювати динаміку поведінки та відносин між окремими підсистемами, а також оцінювати ефективність роботи самої системи, достатньо складно. В ряді робіт [12, 13] розглядаються актуальні техніко-технологічні та організаційно-економічні проблеми удосконалення методів і моделей підвищення енергоефективності відновлюваних джерел енергії в енергетичних системах, досягнення економічно доцільної енергонезалежності територіальних громад, особливо у житловому секторі, та мінімізації негативного впливу на довкілля. При цьому автори наголошують на необхідності врахування якомога більшої кількості взаємопов'язаних підсистем відновлюваних джерел енергії в балансі електроенергії енергетичних систем: способи резервування електроенергії, технічний стан, балансування попиту і пропозиції, забезпечення екологічних вимог та ін.

В роботі [14], на основі залежностей, що характеризують вплив параметрів і структури електротехнічних комплексів із розподіленими джерелами енергії на показники режиму роботи розподільної мережі, запропоновано методику параметричної оптимізації енергетичних систем із розподіленою генерацією щодо техніко-економічного обґрунтування характеристик енергоблоків, яка містить три етапи: формування вихідних даних, визначення граничних потужностей енергоблоків, прямий відбір (оптимізація). Нами, в роботі [15], наголошувалось, що одним із ключових завдань удосконалення принципів і методів формування та реалізації політики енергоефективності в житловому секторі є імплементація

«першочергового принципу енергоефективності» (EE1st), що, окрім термодинамічних та фізико-термодинамічних показників енергоефективності будівель, дозволить формалізувати (розробити систему моніторингу та коригування) економіко-термодинамічних і суто економічних показників.

Традиційним підходом щодо врахування екологічних та соціальних факторів при впровадженні систем розподіленої генерації на муніципальному рівні, як правило, є додавання показників екологічних та соціальних витрат до загальних витрат на виробництво для кожної доступної технології генерації. Однак, як зазначають автори [16], у більшості випадків економічний аспект має пріоритет над соціальними та екологічними факторами. Автори доводять, що ранжування технологій на основі мультиплікативної, попарної взаємодії та багатолінійної агрегації краще відповідає цілям сталого розвитку, ніж адитивна агрегація.

В роботі [17] проведено дослідження застосування методу «аналізу охоплення даних» (DEA), для оптимізації виробництва та споживання енергії в галузевому розрізі. Автори роблять позитивні висновки щодо застосування різних типів прикладних моделей DEA при обґрунтуванні відповідних проєктів. Системний аналіз підходів до оцінювання енергоефективності на рівні підприємств та національної економіки наведено в роботі [18]. Автори, на основі аналізу переваг та недоліків традиційних і сучасних методів, таких як DEA, стохастичний граничний аналіз, аналіз життєвого циклу (*LCA*), моделювання загальної рівноваги та декомпозиційний аналіз роблять висновок, що метод DEA виділяється своєю здатністю аналізувати ефективність використання ресурсів з урахуванням множинних вхідних та вихідних параметрів.

Формулювання цілей статті. Метою статті є обґрунтування методичних підходів до оцінювання енергетичної ефективності локальних мереж розподіленої генерації на основі сонячних електростанцій із застосуванням модифікованої моделі аналізу охоплення даних в контексті децентралізації та декарбонізації житлового сектору/домогосподарств.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель DEA – це інструмент лінійного програмування, який емпірично кількісно визначає відносну ефективність кількох схожих об’єктів, які є однорідними за своєю сутністю (техніко-технологічною, організаційною) та забезпечують трансформацію вхідних характеристик у вихідні [19]. Стосовно оцінки енергоефективності локальної мережі, що містить розподілену генерацію, в тому числі з відновлюваними джерелами, застосування моделі DEA формалізується в оцінку ефективності трансформаційного процесу в системі «вхід – вихід» мережі за умови відповідності її основним експлуатаційним обмеженням. З практичної точки зору енергоефективність локальної мережі визначається залежністю функції енергоефективності вхідних і вихідних індексів у різних сценаріях.

Оцінка енергоефективності локальної мережі, що містить розподілену генерацію є одним із основних критеріїв прийняття рішення щодо реалізації проєктів відповідних гібридних електромереж. Враховуючи об’єктивну складність кількісної оцінки енергоефективності локальної мережі, що містить розподілену генерацію, метод оцінки енергоефективності на основі моделі DEA знаходить все більше поширення [20]. В загальному вигляді оцінка енергоефективності локальної мережі, що містить розподілену генерацію, на основі моделі DEA формалізується наступним алгоритмом.

Перше. Нехай існує Z проєктів локальних мереж з розподіленою генерацією які потрібно оцінити, а набір мереж з розподіленою генерацією, який потрібно оцінити, поданий як $D = \{D_1, D_2, \dots, D_Z\}$.

Друге. Нехай деяка локальна мережа з розподіленою генерацією, що підлягає оцінці D_k , має індексний набір вхідних даних $X_k = [x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}]$, а її вихідний набір індексів буде $Y_k = [y_{1k}, y_{2k}, y_{3k}, y_{4k}]$.

Третє. Нехай ваги вхідних та вихідних індексів локальної мережі D_k будуть w_{rk} і u_{rk} відповідно, тоді вектор ваги вхідного індексу $W_k = [w_{1k}, w_{2k}, w_{3k}]$, а вектор ваги вихідного індексу $U_k = [u_{1k}, u_{2k}, u_{3k}, u_{4k}]$.

Тоді функція енергоефективності розподільної/локальної мережі з розподіленою генерацією буде мати наступний вигляд:

$$E_k(X_k, W_k, Y_k, U_k) = \frac{\sum_{q=1}^4 u_{qk} \cdot y_{qk}}{\sum_{r=1}^3 w_{rk} \cdot x_{rk}}, k = 1, 2, \dots, Z \quad (1)$$

Цілком очевидно, що в рівнянні (1) як набір вхідних та вихідних даних, так і вектор їх ваги для конкретних умов/проектів є змінною величиною. Завдання полягає у виборі/обґрунтуванні відповідного коректного алгоритму як для набору показників/індексів, так і для визначення вагових векторів W_k і U_k та оцінці, на їх основі, енергоефективності локальної мережі.

Формування набору індексів оцінки енергоефективності. Система «вхід – вихід» локальних мереж, які містять об'єкти розподіленої генерації, характеризується набором різних показників: енергетичних, економічних, екологічних, експлуатаційних, управлінських та ін. В першому наближенні їх можна поділити на дві категорії, – основні елементи та операційні вимоги/обмеження (табл. 1).

Таблиця 1. Основні елементи та вимоги до експлуатації локальної мережі, яка містить розподілену генерацію

№	Категорії	Показники
1	Основні елементи.	Звичайне/централізоване джерело живлення.
		Розподілена генерація.
		Розподільча/локальна мережа.
		Навантаження.
2	Операційні вимоги/обмеження.	Нормативно-правове регулювання генерації/енергопостачання.
		Характеристики мереж.
		Характеристики навантаження.
		Якість експлуатації.
		Екологічні показники.
		Рівень управління.

Основні елементи характеризують структуру локальної мережі, а операційні вимоги/обмеження – безпечну та стабільну роботу локальної мережі, якісне і надійне електропостачання, відповідність нормативним

експлуатаційним вимогам характеристик навантаження, екологічні вимоги та оперативне управління.

Набір показників/індексів оцінки енергоефективності. В кожному конкретному випадку набір показників/індексів оцінки енергоефективності проєктів локальної мережі може бути різним. Це залежить як від структури самої мережі, так і від поточних техніко-технологічних і організаційно-економічних задач, для вирішення яких вона впроваджується.

При формуванні набору індексів необхідно дотримуватися наступних принципів: індекси мають бути репрезентативними; індекси повинні відображати один аспект входу або виходу локальної мережі, яка містить розподілену генерацію. Нами пропонується набір із семи індексів, які характеризують локальну мережу з розподіленою генерацією як систему «вхід – вихід» (табл. 2).

Таблиця 2. Пропоновані показники/індекси для характеристики локальної мережі з розподіленою генерацією в системі «вхід – вихід»

Група індексів	Показники/індекси	Характеристика
Набір індексів входу	Частка розподіленої генерації	Частка потужності розподіленої генерації в загальній потужності мережі.
	Еквівалентний опір	Еквівалентний опір різного базового обладнання (лінії розподільної мережі, трансформатори та ін.).
	Комплексна вартість	Приведені (капітальні та експлуатаційні) витрати.
Набір індексів виходу	Експлуатаційне навантаження	Характеризує як загальне навантаження розподільчої мережі так і навантаження розподіленої генерації.
	Якість електроенергії	Визначається багатовимірними індексами, такими як відхилення напруги, відхилення частоти, трифазний дисбаланс, гармоніка, падіння та переривання напруги.
	Скорочення викидів	Відображає вимоги екологічної вигоди від експлуатації розподільної мережі.
	Втрати в мережі	Характеризує втрати енергії в мережі як з технологічної так і з управлінської точок зору (рівень управління роботою мережі).

Наведені в табл. 2 значення показників/індексів визначаються на підставі попередніх техніко-економічних розрахунків (наприклад, частка розподіленої генерації, комплексна вартість) або ж на основі нормативних документів. Так якість електроенергії може визначатися відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу [21].

Вектори ваги групи вхідних $W_k = [w_{1k}, w_{2k}, w_{3k}]$ та вихідних $U_k = [u_{1k}, u_{2k}, u_{3k}, u_{4k}]$ індексів в моделі (1) пропонується визначати експертним методом. Хоча традиційно вважається, що експертний метод застосовується у тих випадках, коли важко або неможливо використати об'єктивні методи, або коли останні дають менш точні і вірогідні результати, чи їх реалізація пов'язана із значними затратами, стосовно проєктів локальних мереж з розподіленою генерацією важливо враховувати особливості їх експлуатації в конкретних населених пунктах. А це, в свою чергу, може впливати на оцінку важливості того або іншого вхідного/вихідного показника в їх загальній структурі.

Приклад застосування моделі (1) проілюструємо на основі реальних проєктів будівництва гібридних сонячних електростанцій номінальною електричною потужністю інвертора «постійний струм – змінний струм» $P = 15$ кВт, з системою накопичення електроенергії і її перетворення потужністю до 30 кВт для забезпечення безперебійного електроживлення роботи окремих ділянок комунального підприємства з надання послуг водопостачання/водовідведення для потреб житлового комплексу/домогосподарств. Зведені показники проєктів наведені в табл. 3.

Наведені в табл. 3 розрахунки отримані на основі обробки значного масиву інформації. Такі розрахунки необхідні на стадії техніко-економічного обґрунтування проєктів, визначення послідовності їх реалізації. Разом з тим, на стадії прийняття стратегічних рішень, при формуванні муніципальних та регіональних програм розвитку розподіленої генерації з відновлюваними джерелами, такі розрахунки проводити не потрібно.

Таблиця 3. Зведені розрахункові показники реалізації проєктів

№	Показники	Розрахункове значення для об'єктів	
		№1	№2
Виробничі показники			
1	Річна генерація, кВт·год./рік	20 108,0	21 658,7
2	Капітальні витрати, грн.	1 895 040,1	2 140 457,3
3	Поточні витрати, грн./рік	185 928,0	185 928,0
4	Результат від надання послуг водопостачання/водовідведення грн./рік	1 356 879,5	840 004,5
5	Чистий грошовий потік, грн./рік	1 170 951,5	654 076,5
6	Частка заміщення електропостачання від сонячної електростанції, %	78,7	71,9
7	Втрати в електромережі, %	6,3	6,3
Екологічні показники			
8	Питомі витрати дизпалива на генерацію електроенергії, кг/мВт·год.	84,0	84,0
9	Сумарні витрати дизпалива на генерацію електроенергії, т/25 років	42,4	45,5
10	Питомі викиди CO ₂ , кг/т	31,4	31,4
11	Зменшення викидів CO ₂ за термін експлуатації при заміщенні генерації дизельними генераторами на СЕС, кг/25 років	1 331,4	1 428,7
Зведені показники ефективності			
12	Простий термін окупності, роки	1,62	3,27
13	Індекс рентабельності	3,25	1,91
14	Вирівняна вартість енергії (LCOE), грн/кВт·год.	6,85	2,54
15	Питомі капітальні витрати, грн./кВт·год.	94,24	98,83

В табл. 4 проведені розрахунки відносних показників енергоефективності проєктів, аналогічних наведеним в табл. 3.

Вагове значення показників входу і виходу, наведених в табл. 4, приймалось на основі експертної оцінки. Співставлення результатів оцінки, наведених в табл. 3 і 4 свідчить, що об'єкт №1 має кращі показники енергоефективності, які визначались, відповідно, на основі як загальноприйнятих методів, так і на основі модифікованої моделі DEA. Разом з тим, відносний показник енергоефективності враховує більш широкий спектр факторів, які впливають на оцінку.

Таблиця 4. Відносні показники енергоефективності проєктів

№	Показники	Значення для об'єктів		Вагове значення, частка од.
		№1	№2	
Показники входу				
1	Еквівалентний опір, Ω	17,3	17,3	0,15
2	Частка розподіленої генерації,%	78,7	71,9	0,15
3	Комплексна вартість, грн.	1 895 040,1	2 140 457,3	0,7
Показники виходу				
4	Експлуатаційне навантаження, МВт·год/рік	20 108,04	21 658,7	0,45
5	Якість електроенергії, %	0,89	0,89	0,1
6	Скорочення викидів CO ₂ , кг/25 років	1 331,4	1 428,7	0,2
7	Втрати в мережі, МВт·год	1 270,6	1 364,5	0,25
Відносний показник енергоефективності		0,73	0,69	

Висновки. Проведені дослідження свідчать, що модифікована модель DEA дозволяє отримати коректні оцінки відносної енергоефективності проєктів локальних мереж та має декілька переваг: здатність обробляти численні вхідні та вихідні дані, коли існує різна кількість показників, пов'язаних з потенційними цілями вищого порядку; не вимагає визначення функціональних зв'язків між вхідними та вихідними даними; дозволяє суттєво скоротити трудомісткість оцінювання енергоефективності на стадії прийняття стратегічних рішень.

Для подальшого удосконалення інформаційно-аналітичного наповнення оцінювання відносної енергоефективності локальних мереж з розподіленою генерацією доцільно накопичувати банк даних про залежність питомих капіталовкладень від потужності різних технічних рішень (як складової національна система з моніторингу енергоефективності), налагодити систематизацію та інформаційний обмін всіх баз даних, що містять інформацію про первинне та кінцеве споживання енергії.

Література

1. Розпорядження КМУ від 18.07.2024 р. № 713-р «Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках»

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text> (дата звернення 08.08.2025).

2. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast) URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng> (дата звернення 08.08.2025).

3. Протокол про приєднання України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства Офіційний вісник України. 2011. № 32. стор. 153. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_a27#Text (дата звернення 08.08.2025).

4. Розподілена генерація у громадах: фокус на ВДЕ. URL: <http://sdia.org.ua/rozpodilena-heneratsiia-u-hromadakh-fokus-na-vde/> (дата звернення 08.08.2025).

5. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 р. № 761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення 08.08.2025).

6. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2021 р. № 1803-р «Про затвердження Національного плану дій з енергоефективності на період до 2030 року» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (дата звернення 08.08.2025).

7. Про енергоефективність, внесення змін до директив 2009/125/ЄС і 2010/30/ЄС та про скасування директив 2004/8/ЄС і 2006/32/ЄС: Директива Європейського Парламенту і Ради 2012/27/ЄС від 25.10.2012 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text (дата звернення 08.08.2025).

8. Денисюк С. П., Гілевич К. М. Оптимізація використання розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах за критерієм мінімуму втрат електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2023. № 4(74). С. 7-21. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290880>.

9. Rausch, P., Suchanek, M. Socioeconomic Factors Influencing the Prosumer's Investment Decision on Solar Power. *Energies*. 2021. vol. 14(21). Pages 1-10. URL: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v14y2021i21p7154-d669852.html>.

10. Monghasemi, N., Vadiee, A., Kyprianidis, K. and Jalilzadehazhari, E. Rank-Based Assessment of Grid-Connected Rooftop Solar Panel Deployments Considering Scenarios for a Postponed Installation. *Energies*. 2023. vol. 16(21). Pages 1-16. URL: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v16y2023i21p7335-d1270103.html>

11. Nasima El Assri, Samira Chabaa, Khadija Lmesri, Mohammed Ali Jallal and Abdelouhab Zeroua Modeling techniques for decentralized energy systems applied in smart grids. *The 4th International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE'2021)*. 2021. vol. 297. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129701068>.

12. Формування технологічних структур енергонезалежних громад: монографія / за заг. ред. В. В. Каплуна / Національний університет біоресурсів і природокористування України; Інститут загальної енергетики НАН України. Одеса: Видавничий дім «Гельветика». 2024. 312 с. URL: <https://www.ienergy.kyiv.ua/vydavnycha-diialnist/monohrafii.html>.

13. Рубаненко О.О. Підвищення енергоефективності відновлюваних джерел енергії: монографія. Вінниця: Влавке. 2024, 428 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/44494>.

14. Самойлик О.В., Ткаченко В.Ф. Підвищення ефективності розподіленої генерації у складі електротехнічного комплексу. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32(71). № 5. С. 184-191. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/28>.

15. Теліженко О.М., Курбатова Т.О., Прокопенко О.В. Управління енергоефективністю домогосподарств: проблеми і принципи оцінювання. *Ефективна економіка*. 2023. № 9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2023_9_8.

16. Charles Turkson, Wenbin Liu, Adolf Acquaye A data envelopment analysis based evaluation of sustainable energy generation portfolio scenarios.

Applied Energy 2024. vol. 363. no. 123017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924004008>.

17. Mohtashami, Z., Khedmati, M., Eshghi, K. Applications of Data Envelopment Analysis (DEA) for Optimizing Energy Consumptions. In: Fathi, M., Zio, E., Pardalos, P.M. (eds). *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, Cham. 2023. Pages 1435–1475. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97940-9_49.

18. Кишакевич Б. Ю., Настьошин С. Є. Сучасні підходи до оцінювання енергоефективності національної економіки. *Бізнес Інформ*. 2022. № 9. С. 34-39. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001378070>.

19. Mario Martín-Gamboa and Diego Iribarren Chapter 16 - Coupled life cycle thinking and data envelopment analysis for quantitative sustainability improvement. Book: *Methods in Sustainability Science. Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization*. Elsevier Inc. 2021. Pages 295-320. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/data-envelopment-analysis>.

20. Weng, L.G., Yu, B., Lian, D.Q. and Shou, T. An Energy Efficiency Assessment Method for Distribution Network Containing DG. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2022. №10. Pages 75-84. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.108006>.

21. Постанова Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 р. № 310 «Про затвердження Кодексу систем розподілу» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text> (дата звернення 08.08.2025).

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine (2024), Order: “On approval of the Distributed Generation Development Strategy for the period until 2035 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2024 – 2026”, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text> (Accessed 08 August 2025).

2. EUR-Lex (2019), “Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 “On common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast)”, available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng> (Accessed 08 August 2025).

3. Verkhovna Rada of Ukraine (2011), “Protocol on the Accession of Ukraine to the Treaty Establishing the Energy Community”, available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_a27#Text (Accessed 08 August 2025).

4. SDIA (2025), “Distributed generation in communities: focus on renewables”, available at: <http://sdia.org.ua/rozpodilena-heneratsiia-u-hromadakh-fokus-na-vde/> (Accessed 08 August 2025).

5. Cabinet of Ministers of Ukraine (2024), Order: “On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period until 2030 and the action plan for its implementation”, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (Accessed 08 August 2025).

6. Cabinet of Ministers of Ukraine (2021), Order: “On approval of the National Energy Efficiency Action Plan for the period until 2030” available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (Accessed 08 August 2025).

7. EUR-Lex (2012), “Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25.10.2012: “On energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EC and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC” available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text (Accessed 08 August 2025).

8. Denisyuk, S. P. and Gilevich, K. M. (2023), “Optimization of the use of distributed energy resources in local electric power systems according to the criterion of minimum electricity losses”, *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*, vol. 4(74), pp. 7-21. DOI <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290880>.

9. Rausch, P. and Suchanek, M. (2021), “Socioeconomic Factors Influencing the Prosumer’s Investment Decision on Solar Power”, *Energies*, vol. 14(21), pp. 1-

10, available at: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v14y2021i21p7154-d669852.html> (Accessed 05 Aug 2025).

10. Monghasemi, N., Vadiiee, A., Kyprianidis, K. and Jalilzadehazhari, E. (2023), “Rank-Based Assessment of Grid-Connected Rooftop Solar Panel Deployments Considering Scenarios for a Postponed Installation”, *Energies*. vol. 16(21). pp. 1-16, available at: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v16y2023i21p7335-d1270103.html> (Accessed 05 Aug 2025).

11. El Assri, N, Chabaa, S., Lmesri, K., Ali Jallal, M. and Zeroua, A. (2021), “Modeling techniques for decentralized energy systems applied in smart grids”, *The 4th International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE'2021)*, vol. 297. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129701068>.

12. Kaplun, V. V. (2024), *Formuvannia tekhnologichnykh struktur enerhonezaleznykh hromad: monohrafiia* [Formation of technological structures of energy-independent communities: monograph], Vydavnychiy dim «Helvetyka», Odesa, Ukraine, available at: <https://www.ienergy.kyiv.ua/vydavnycha-diialnist/monohrafii.html> (Accessed 05 Aug 2025).

13. Rubanenko, O.O. (2024), *Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti vidnovliuvanykh dzherel enerhii: monohrafiia* [Increasing energy efficiency of renewable energy sources: monograph.], Vlavke, Vinnytsia, Ukraine, available at: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/44494> (Accessed 05 Aug 2025).

14. Samoilyk, O.V., Tkachenko, V.F. (2021), “Increasing the efficiency of distributed generation as part of the electrotechnical complex”, *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, vol. 32(71), no. 5, pp. 184-191. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/28>.

15. Telizhenko, O.M., Kurbatova, T.O. and Prokopenko, O.V. (2023), “Household energy efficiency management: problems and principles of assessment”, *Efektivna ekonomika*. vol. 9. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.9.6>.

16. Turkson, C, Liu, W and Acquaye, A. (2024), “A data envelopment analysis based evaluation of sustainable energy generation portfolio scenarios”.

Applied Energy vol. 363. no. 123017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123017>.

17. Mohtashami, Z., Khedmati, M., and Eshghi, K. (2023), Applications of Data Envelopment Analysis (DEA) for Optimizing Energy Consumptions. In: Fathi, M., Zio, E., Pardalos, P.M. (eds). *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, Cham. pp. 1435–1475. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97940-9_49.

18. Kyshakevich, B. Yu., Nastyoshyn, S. Ye. (2022), “Modern approaches to assessing the energy efficiency of the national economy”, *Biznes Inform*, vol. 9, pp.34-39. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-9-34-39>.

19. Martín-Gamboa, M. and Iribarren, D. (2021), Chapter 16 - Coupled life cycle thinking and data envelopment analysis for quantitative sustainability improvement. Book: *Methods in Sustainability Science. Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization*. Elsevier Inc. pp. 295-320. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/data-envelopment-analysis>.

20. Weng, L.G., Yu, B., Lian, D.Q. and Shou, T. (2022), “An Energy Efficiency Assessment Method for Distribution Network Containing DG”, *Journal of Power and Energy Engineering*. vol. 10, pp. 75-84. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.108006>.

21. National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors (2018), Resolution: “On Approval of the Distribution Systems Code”, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text> (Accessed 08 August 2025).

Стаття надійшла до редакції 10.08.2025 р.