УДК 504.06:330.15
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.5

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ М. МИКОЛАЄВА

Чайка В.В. (orcid.org/0009-0009-0369-6780),
Григор'єва Л.І. (orcid.org/0000-0001-9452-2982)
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, 54003, м. Миколаїв
Valeriya.chayka@gmail.com

У статті виконано еколого-економічну оцінку використання гібридної сонячної електростанції для малого медичного підприємства на прикладі медичного центру Eco-BioMed у місті Миколаєві. Проблема дослідження пов'язана з необхідністю підвищення енергетичної стійкості соціально важливих об'єктів у прифронтовому регіоні в умовах воєнного стану, аварійних відключень електроенергії та високої залежності від дизельних генераторів. Обґрунтовано, що для медичного центру, діяльність якого охоплює фізіотерапевтичні, бальнеологічні, консультаційні та діагностичні послуги, стабільне електропостачання має не лише виробниче, а й соціальне значення. Методика дослідження включала аналіз вихідного електроспоживання, підбір потужності фотоелектричної системи, розрахунок кількості модулів, площі покрівлі, ємності акумуляторного блоку, орієнтовної автономності, очікуваної річної генерації, строку окупності та потенційного зменшення викидів CO_2 у разі скорочення роботи дизельного генератора.

Для об'єкта прийнято гібридну СЕС проєктною потужністю 50 кВт із 84 фотоелектричними модулями потужністю 600 Вт кожний, фактичною встановленою DC-потужністю 50,4 кВт та акумуляторним блоком 51,2 кВт·год. Розраховано, що для розміщення модулів потрібно близько 235 м² покрівлі, а корисна ємність акумуляторів близько 46,1 кВт·год може забезпечити приблизно 3,8 год автономної роботи за навантаження 12,1 кВт. За середнім сценарієм очікувана річна генерація становить близько 64,4 тис. кВт·год, що перевищує поточне річне споживання об'єкта. Простий строк окупності за сценарієм заміщення мережевої електроенергії становить близько 4,04 року, а з урахуванням орієнтовного технічного обслуговування – 4,30 року. У сценарії заміщення дизельного генератора потенційне скорочення споживання пального може досягати 23040 л/рік, що відповідає уникненню близько 61,7 т CO_2 на рік. Отримані результати можуть бути використані для попереднього обґрунтування СЕС на інших малих підприємствах та соціально важливих об'єктах. *Ключові слова:* гібридна сонячна електростанція, медичний центр, енергетична стійкість, Миколаїв, акумуляторний блок, дизельний генератор, викиди CO_2, строк окупності.

Ecological and Economic Assessment of the Use of a Hybrid Solar Power Plant and Its Impact on the Environment of the City of Mykolaiv. Chaika V., Grygorieva L.

The article presents an environmental and economic assessment of implementing a hybrid solar power plant for a small medical enterprise, using the Eco-BioMed Medical Center in Mykolaiv as a case study. The research problem is related to the need to improve the energy resilience of socially important facilities in a frontline region under martial law, emergency power outages and dependence on diesel generators. The study argues that for a medical center providing physiotherapy, balneological, consultation and diagnostic services, stable electricity supply has not only an operational but also a social function. The methodological basis of the study includes analysis of initial electricity consumption, selection of photovoltaic system capacity, calculation of the number of modules, required roof area, battery storage capacity, estimated autonomy, expected annual generation, payback period and potential reduction of CO_2 emissions if diesel generator operation is replaced.

A hybrid solar power plant with a design capacity of 50 kW was considered for the facility. The system includes 84 photovoltaic modules with a capacity of 600 W each, resulting in an installed DC capacity of 50.4 kW, and a $LiFePO_4$ battery block with a nominal capacity of 51.2 kWh. It was calculated that approximately 235 m² of roof area is required for module placement. The useful battery capacity of about 46.1 kWh can provide approximately 3.8 hours of autonomous operation at a load of 12.1 kW. Under the average scenario, the expected annual generation is about 64.4 thousand kWh, which exceeds the current annual consumption of the facility. The simple payback period in the scenario of replacing grid electricity is about 4.04 years, or 4.30 years when estimated operation and maintenance costs are taken into account. In the diesel generator replacement scenario, the potential reduction in diesel consumption may reach 23,040 liters per year, corresponding to avoided emissions of approximately 61.7 t CO_2 per year. The obtained results can be used as a preliminary methodology for justifying solar power systems for other small enterprises, medical facilities and socially important infrastructure objects in Ukrainian cities. *Key words:* hybrid solar power plant, medical center, energy resilience, Mykolaiv, battery storage, diesel generator, CO_2 emissions, payback period.

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану енергозабезпечення соціально важливих об'єктів набуло ознак чинника екологічної та соціальної безпеки. Для прифронтових міст, зокрема Миколаєва, перебої електропостачання змушують підприємства використовувати дизельні генератори, що підвищує собівартість послуг, створює локальні викиди CO_2, NOx, CO і твердих частинок, а також формує шумове

© Чайка В.В., Григор'єва Л.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

навантаження. Для медичного закладу така залежність є особливо проблемною, оскільки від електроенергії залежать водні процедури, насоси, освітлення, зв'язок, реєстрація, частина діагностичного та фізіотерапевтичного обладнання.

Актуальність дослідження визначається потребою перейти від загального опису переваг відновлюваної енергетики до кількісної оцінки її придатності для конкретного об'єкта. Для медичного центру важливо розрахувати потужність СЕС, кількість модулів, площу покрівлі, резерв акумуляторного блоку, очікувану генерацію, окупність і екологічний ефект від зменшення роботи дизельного генератора.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження пов'язане із завданнями децентралізації енергопостачання, підвищення енергетичної безпеки міської інфраструктури, скорочення використання викопного пального та зменшення локального техногенного навантаження. Практична складова полягає у виконанні розрахунків для конкретного об'єкта – медичного центру Eco-BioMed у місті Миколаєві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових і прикладних працях сонячна енергетика розглядається як механізм декарбонізації, зниження залежності від централізованої генерації та підвищення стійкості локальних енергосистем. Нормативну основу розвитку альтернативної енергетики в Україні формує законодавство про альтернативні джерела енергії [1]. Для попереднього оцінювання сонячного потенціалу доцільно застосовувати інструменти PVGIS та Global Solar Atlas [2; 3].

Професійні програмні середовища, зокрема PVsyst, використовуються для деталізації втрат, параметрів інверторів, орієнтації модулів і впливу затінення [4]. Екологічна оцінка гібридних систем часто виконується за методом заміщення споживання дизельного пального із застосуванням емісійних коефіцієнтів CO_2; у цій роботі використано коефіцієнт викидів для дизельного пального за даними U.S. Energy Information Administration [6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо розкритими залишаються прикладні розрахунки для малих медичних підприємств у містах, що працюють за умов воєнного стану: вибір потужності СЕС, площа покрівлі, автономність акумуляторного блоку, строк окупності та обсяг уникнених викидів CO_2 у разі скорочення роботи дизельного генератора.

Новизна дослідження полягає у проведенні комплексної еколого-економічної оцінки використання гібридної сонячної електростанції як інструменту зниження негативного впливу на навколишнє середовище малого медичного підприємства у м. Миколаєві в умовах воєнного стану. У роботі вперше для обраного об'єкта комплексно поєднано оцінку екологічного ефекту від скорочення викидів CO_2 та зменшення використання викопного палива з економічною оцінкою ефективності впровадження гібридної системи, що включає фотоелектричні модулі, акумуляторний блок і резервне дизельне електроживлення. Отримано взаємопов'язані кількісні результати щодо оптимальної конфігурації системи, встановленої потужності, площі розміщення, рівня енергетичної автономності, річної генерації електроенергії, строку окупності та потенціалу зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Методологічне значення роботи полягає у застосуванні послідовного алгоритму, який поєднує технічний, економічний і екологічний блоки: аналіз споживання; підбір потужності СЕС; визначення кількості модулів; геометричний розрахунок площі; енергетичний розрахунок акумуляторів; оцінку генерації за PVOUT [2; 3]; визначення простого строку окупності; оцінку уникнених викидів CO_2 за обсягом потенційно зекономленого дизельного пального [6].

Викладення основного матеріалу. Об'єктом дослідження обрано медичний центр Eco-BioMed у місті Миколаєві. За інформацією офіційного сайта, заклад надає медичні, фізіотерапевтичні та бальнеологічні послуги, що передбачає потребу у стабільній роботі водних процедур, масажного і фізіотерапевтичного напрямів, консультацій лікарів, УЗД, забору аналізів та допоміжного обладнання [5]. Вихідні параметри для подальших розрахунків наведено в табл. 1.

Дані табл. 1 показують, що річне електроспоживання об'єкта становить 27960 кВт·год. За тарифом 12,85 грн/кВт·год це відповідає 359286 грн витрат на електроенергію за рік. Прийнята потужність СЕС 50 кВт є більшою за середнє робоче навантаження об'єкта, тому система розглядається не лише як джерело компенсації споживання, а й як резерв для швидкого заряджання акумуляторів та покриття пікових денних потреб.

Таблиця 1

Вихідні дані для еколого-економічної оцінки гібридної СЕС Eco-BioMed

Показник	Значення
Місце реалізації	м. Миколаїв, медичний центр Eco-BioMed
Тип об'єкта	мале підприємство медичного профілю
Середнє місячне споживання	2330 кВт·год/міс
Річне споживання	27960 кВт·год/рік
Тариф на електроенергію	12,85 грн/кВт·год
Проєктна потужність СЕС	50 кВт
Потужність 1 фотоелектричного модуля	600 Вт
Акумуляторний блок	10 батарей по 5,12 кВт·год
Дизельний сценарій	10 л/год, 8 год/день, 24 дні/міс

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Перший розрахунковий блок стосується визначення кількості фотоелектричних модулів, встановленої потужності та площі розміщення. Розрахунок кількості модулів виконано за базовим інженерним підходом: необхідна потужність системи ділиться на номінальну потужність одного модуля, після чого результат округлюється до більшого цілого значення. Для СЕС потужністю 50 кВт і модулів по 600 Вт кількість панелей визначається за формулою:

$$N = 50\,000 / 600 = 83{,}3 \approx 84 \text{ шт.}$$

Фактична встановлена DC-потужність становить:

$$P_{DC} = 84 \times 600 = 50\,400 \text{ Вт} = 50{,}4 \text{ кВт.}$$

За розміру одного модуля 2,382 × 1,134 м площа однієї панелі визначено геометричним методом і дорівнює 2,70 м². Узагальнені результати технічного підбору наведено в табл. 2.

Результати табл. 2 свідчать, що станція має фактичну встановлену потужність 50,4 кВт, тобто на 0,4 кВт більше за проєктне значення. Для розміщення 84 модулів потрібно 226,9 м² чистої площі, а з урахуванням монтажних відступів і технічних зон – близько 235 м². Основний схил із 67 модулями формує 40,2 кВт потужності, другий схил із 17 модулями – 10,2 кВт. Такий розподіл дає змогу розтягнути генерацію протягом дня і краще пристосувати її до денного режиму роботи медичного центру.

Таблиця 2

Розрахунок кількості модулів, потужності та площі СЕС

Показник	Розрахунок / значення
Проєктна потужність СЕС	50 кВт
Розрахункова кількість модулів	50 000 / 600 = 83,3 шт.
Прийнята кількість модулів	84 шт.
Фактична встановлена DC-потужність	84 × 600 = 50,4 кВт
Площа одного модуля	2,382 × 1,134 = 2,70 м²
Сумарна площа модулів без резерву	84 × 2,70 = 226,9 м²
Прийнята площа з монтажним резервом	близько 235 м²
Орієнтовний розподіл за схилами	67 модулів на основному схилі, 17 модулів на другому

Для забезпечення роботи критичних споживачів під час відключень у складі системи передбачено акумуляторний блок $LiFePO_4$. Розрахунок ємності виконано за енергетичним балансом: номінальна ємність дорівнює добутку кількості батарей на ємність однієї батареї, а корисна ємність визначається з урахуванням допустимої глибини використання заряду. Номінальна ємність становить:

$$E_АКБ = 10 \times 5{,}12 = 51{,}2 \text{ кВт·год.}$$

Для безпечної експлуатації прийнято використання 90 % номінальної ємності, тому корисний запас енергії становить:

$$E_кор = 51{,}2 \times 0{,}90 = 46{,}1 \text{ кВт·год.}$$

Залежність автономності від рівня критичного навантаження наведено в табл. 3.

За даними табл. 3, акумуляторний блок не слід розглядати як джерело тривалого живлення всього медичного центру. Якщо підключити повне навантаження 40 кВт, автономність становитиме лише близько 69 хв. Натомість за навантаження 12,1 кВт система може працювати близько 3,8 год, а за критичного режиму 5 кВт – понад 9 год.

Таблиця 3

Розрахунок автономності акумуляторного блоку

Потужність критичного навантаження	Орієнтовна автономність	Орієнтовна автономність у хвилинах
5 кВт	9,22 год	553 хв
10 кВт	4,61 год	276 хв
12,1 кВт	3,81 год	228 хв
20 кВт	2,30 год	138 хв
40 кВт	1,15 год	69 хв

Отже, практично доцільно виділити окрему резервну групу споживачів: аварійне освітлення, зв'язок, реєстратуру, частину насосного та медичного обладнання.

Очікуваний річний виробіток електроенергії визначено методом питомого річного виробітку PVOUT, який застосовується у Global Solar Atlas і PVGIS [2; 3]. У розрахунках прийнято діапазон 1241-1314 кВт·год/кВтр на рік, а середнє значення – 1277,5 кВт·год/кВтр на рік. Розрахунок виконується за формулою:

$$E_{СЕС} = P_{DC} \times PVOUT.$$

Результати оцінки очікуваної генерації наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Оцінка річної генерації СЕС потужністю 50,4 кВт

Сценарій	PVOUT, кВт·год/кВтр·рік	Очікувана генерація, кВт·год/рік	Співвідношення до річного споживання
Мінімальний	1241	62546	2,24 раза
Середній	1277,5	64386	2,30 раза
Максимальний	1314	66226	2,37 раза

З табл. 4 видно, що навіть у мінімальному сценарії очікувана генерація 62546 кВт·год/рік більш ніж удвічі перевищує поточне річне споживання медичного центру 27960 кВт·год. У середньому сценарії виробіток становить 64386 кВт·год/рік, тобто потенційний надлишок щодо поточного споживання дорівнює 36426 кВт·год/рік. Наведене підтверджує, що система 50 кВт обрана не тільки для компенсації середнього споживання, а й для роботи з акумулято-

рами, піковими навантаженнями та можливим використанням надлишкової енергії у денні години.

Економічна оцінка виконана методом порівняння сценаріїв енергозабезпечення: мережевого, дизельного та сонячного. Для СЕС використано показник простого строку окупності, який визначається як відношення капітальних витрат до річної економії. Вартість проєкту прийнято на рівні 32800 дол. США, або 1449760 грн за курсу 44,2 грн/дол. США. Місячні витрати на мережеву електроенергію становлять:

$$C_{мер} = 2330 \times 12{,}85 = 29\,940{,}5 \text{ грн/міс.}$$

Річні витрати на мережеву електроенергію становлять 359286 грн/рік. У дизельному сценарії споживання пального розраховано за витратою генератора 10 л/год, режимом 8 год/день і 24 робочими днями на місяць; воно дорівнює 1920 л/міс, а за ціни 89 грн/л витрати становлять 170880 грн/міс, або 2050560 грн/рік.

Узагальнені економічні та екологічні результати наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Економічна та екологічна оцінка використання гібридної СЕС

Показник	Значення
Капітальні витрати на СЕС	1 449 760 грн
Річні витрати на електроенергію з мережі	359 286 грн/рік
Орієнтовні витрати на обслуговування СЕС	21 746 грн/рік
Простий строк окупності без O&M	4,04 року
Простий строк окупності з урахуванням O&M	4,30 року
Річні витрати дизельного генератора у прийнятому сценарії	2 050 560 грн/рік
Потенційне споживання дизельного пального	23 040 л/рік
Коефіцієнт викидів CO_2 для дизельного пального	2,68 кг CO_2/л
Потенційне уникнення викидів CO_2	61,7 т CO_2/рік

Дані табл. 5 показують, що за сценарієм повного заміщення мережевої електроенергії простий строк окупності становить 4,04 року, а з урахуванням орієнтовного обслуговування – 4,30 року. У разі часткового самоспоживання окупність буде довшою, тому важливо організувати корисне використання денного виробітку: заряджання акумуляторів, роботу насосів, підігрів води або інші керовані навантаження. Найбільший економічний ефект виникає у дизельному сценарії, оскільки річні витрати на пальне у прийнятому режимі у 5,7 раза перевищують річні витрати на мережеву електроенергію.

Екологічний ефект оцінено за методом емісійного коефіцієнта: обсяг дизельного пального, який потенційно не спалюється, множиться на коефіцієнт викидів CO_2. Якщо робота дизельного генератора у прийнятому сценарії зменшується на 23040 л пального на рік, то за коефіцієнта 2,68 кг CO_2/л потенційне скорочення викидів становить 61747,2 кг CO_2, або 61,7 т CO_2 на рік [6]. Крім парникових газів, зменшується локальний вплив продуктів згоряння, шуму та вібрації.

Соціальний результат використання СЕС полягає у підвищенні безперервності надання послуг. Гібридна система не усуває всі ризики відключень, але дозволяє підтримувати критичні споживачі протягом кількох годин, зменшує потребу у негайному запуску генератора і підвищує прогнозованість роботи центру. Для прифронтового міста така перевага має не лише господарське, а й громадське значення.

Головні висновки. У статті обґрунтовано доцільність використання гібридної СЕС для малого медичного підприємства у місті Миколаєві. Для медичного центру Eco-BioMed прийнято систему потужністю 50 кВт, що реалізується через 84 фотоелектричні модулі по 600 Вт. Фактична встановлена DC-потужність становить 50,4 кВт, а необхідна площа покрівлі з урахуванням монтажного резерву – близько 235 м².

Акумуляторний блок ємністю 51,2 кВт·год має корисний запас близько 46,1 кВт·год. За навантаження 12,1 кВт він забезпечує приблизно 3,8 год автономної роботи, а за критичного навантаження 5 кВт – понад 9 год, що підтверджує необхідність виділення окремої групи пріоритетних споживачів, а не підключення всього об’єкта до резервної лінії.

Очікувана річна генерація у середньому сценарії становить близько 64386 кВт·год/рік, що у 2,30 раза перевищує поточне річне споживання об’єкта. Простий строк окупності за сценарієм заміщення мережевої електроенергії становить 4,04 року, а з урахуванням орієнтовного технічного обслуговування – 4,30 року. У дизельному сценарії потенційне скорочення споживання пального може досягати 23040 л/рік, що відповідає уникненню близько 61,7 т CO_2/рік.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані як попередня модель для оцінювання доцільності використання гібридних СЕС на інших малих підприємствах, медичних кабінетах, реабілітаційних центрах, ОСББ та соціально важливих об’єктах. Подальше уточнення має включати енергетичний аудит за 12 місяців, погодинний профіль навантаження, перевірку несучої здатності покрівлі, моделювання затінення у PVGIS або PVsyst та аналіз можливостей корисного використання надлишкової генерації.

Література

1. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20 лютого 2003 р. № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15 (дата звернення: 09.07.2026).
2. PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System / European Commission, Joint Research Centre. URL: https://photovoltaic-geographic-information-system.ec.europa.eu/en (дата звернення: 09.07.2026).
3. Global Solar Atlas / World Bank Group, Solargis. URL: https://globalsolaratlas.info/ (дата звернення: 09.07.2026).
4. PVsyst. Photovoltaic system simulation software products. URL: https://www.pvsyst.com/en/ (дата звернення: 09.07.2026).
5. Eco-BioMed. Офіційний сайт медичного центру. URL: https://eco-biomed-ua.odoo.com/contacts (дата звернення: 09.07.2026).
6. U.S. Energy Information Administration. Carbon Dioxide Emissions Coefficients. URL: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php (дата звернення: 09.07.2026).
7. International Energy Agency. Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. URL: https://www.iea.org/reports/renewables-2023 (дата звернення: 09.07.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 21.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026