

УДК 621.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).24](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).24)**LABORATORY SETUP FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS
OF A PHOTOELECTRIC CONVERTER****ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА****Heorhii V. Babkin**

georgii.babkin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-6303-0993

Dmytro V. Kostenko

dmi.kostenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1164-3066

Vasyl M. Ovsiannikov

laboratoria221@gmail.com

ORCID: 0009-0006-5585-4953

Г. В. Бабкін,

канд. техн. наук, доцент

Д. В. Костенко,

канд. техн. наук, доцент

В. М. Овсянников,

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. To meet the growing needs of the population for electricity, especially those living far from large energy supply centers, the use of renewable energy sources is becoming increasingly relevant. In addition, modern technological processes are very energy-intensive. Enterprises located in remote areas, including those in remote areas, are easier to provide with energy resources using renewable energy sources. In addition, in the circumstances, an important issue is the organization of reliable power supply in an autonomous mode.

Existing power supply technologies are not always easily adapted for use in small and medium-sized enterprises. Renewable energy sources can play an important role in solving this problem. Active research into technologies for autonomous generation of electric and thermal energy, its rational distribution and consumption through the use of energy-saving technologies is very relevant today. To solve the problem, a review and analysis of existing methods of generating electric energy was carried out, a review of the most powerful existing power plants using renewable energy sources was carried out. An analysis of the solar energy potential of Ukraine was carried out.

Based on the results obtained, a justification and development of a laboratory installation for studying the characteristics of a solar power plant using photovoltaic converters was carried out for the preparation of master students in the curriculum “Electricity Generation and Power Supply Systems”, as well as conducting scientific experiments by postgraduate students and teachers of the Department of “Electrical Engineering of Ship and Robotic Complexes”, the Educational and Scientific Institute of Automation and Electrical Engineering of the Admiral Makarov National Shipbuilding University.

In the process of setting up a prototype of the laboratory installation, a number of experiments were conducted in order to clarify its operating characteristics, a list of training experiments was compiled and a methodology for their implementation was developed. The volt-ampere characteristics of the photovoltaic converter were recorded, the optimal operating modes of the installation equipment were selected. A list of recommendations for the modernization of the laboratory installation and the main directions in the field of studying and developing power generating installations with photovoltaic converters was compiled.

Purpose. Creation of a laboratory facility for researching modern renewable energy sources.

Method. When conducting research, the following were used: modern methods and processes of design and manufacturing, methods of mathematical modeling, and mathematical methods of calculation and analysis.

Results. A facility has been created for laboratory research of solar energy installations, using modern additive phototyping technologies.

Practical importance. In order to improve the quality of master's training in the “Electricity Generation and Power Supply Systems” program, as well as for conducting scientific experiments by postgraduate students, a laboratory complex was installed for the study of solar energy installations.

Key words: renewable energy sources; laboratory installation; solar power plant; modeling; mathematical methods of calculation and analysis.

Анотація. Задоволення зростаючих потреб населення електроенергії, особливо що живе далеко від великих центрів енергопостачання, дедалі актуальнішим стає застосування поновлюваних джерел енергії. Крім того, сучасні технологічні процеси є дуже енергоємними. Підприємства, розташовані в тому числі у віддалених районах, легше забезпечити енергоресурсами з використанням відновлюваних джерел енергії. Крім того, в обставинах, важливим питанням є організація надійного електропостачання в автономному режимі.

Існуючі технології енергопостачання не завжди легко адаптовані для використання на малих та середніх підприємствах. Важливу роль у вирішенні цієї проблеми можуть зіграти відновлювані джерела енергії. Активне дослідження технологій автономної генерації електричної та теплової енергії, її раціональне розподілення та споживання за рахунок використання енергозберігаючих технологій дуже актуальні нині.

Для вирішення поставленої задачі було виконано огляд та аналіз існуючих способів генерації електричної енергії, виконано огляд найбільш потужних існуючих електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії. Проведено аналіз сонячного енергетичного потенціалу України.

На підставі отриманих результатів виконано обґрунтування та розробка лабораторної установки для вивчення характеристик сонячної електростанції з використанням фотоелектричних перетворювачів для підготовки магістрів учнів за навчальною програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також проведення наукових експериментів аспірантами та викладачами кафедри «Електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів», навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

У процесі налагодження дослідного зразка лабораторної установки був проведений ряд експериментів, з метою уточнення її робочих характеристик, складено перелік навчальних експериментів та розроблено методику їх виконання. Знято вольт-амперні характеристики фотоелектричного перетворювача, обрано оптимальні режими роботи обладнання установки. Складено перелік рекомендацій щодо модернізації лабораторної установки та основних напрямів у галузі вивчення та розробки електрогенеруючих установок з фотоелектричними перетворювачами.

Мета. Створення лабораторної установки для дослідження сучасних відновлюваних джерел енергії.

Методика. При виконанні досліджень використовувались: сучасні методи та процеси проектування та виготовлення, методи математичного моделювання та математичні методи розрахунку та аналізу.

Результати. Створено установку для лабораторних досліджень сонячних енергетичних установок, з використанням сучасних адитивних технологій пототипування.

Практична значимість. З метою підвищення якості підготовки магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами було змонтовано лабораторний комплекс для дослідження сонячних енергетичних установок.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; лабораторна установка; сонячна електростанція; моделювання; математичні методи розрахунку та аналізу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для задоволення зростаючих потреб у електроенергії населення, особливо що живе далеко від централізованих центрів енергопостачання, дедалі актуальнішим стає застосування відновлюваних джерел енергії. Крім того, технологічні процеси в нафтогазовій галузі є вельми енергоємними. Підприємства нафтогазової галузі, розташовані у тому числі у віддалених районах, легше забезпечити енергоресурсами, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії. Важливим питанням є організація надійного електропостачання в автономному режимі.

Також існуючі технології енергопостачання не завжди легко адаптовані для використання на малих та середніх підприємствах. Важливу роль цьому питанні можуть зіграти відновлювані джерела енергії. Отже, дослідження технологій автономної генерації електричної та теплової енергії, раціональне її споживання за рахунок використання енергозберігаючих технологій є вельми актуальними в даний час.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Створення лабораторної установки для дослідження сучасних відновлюваних джерел енергії.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Необхідно здійснити огляд сучасних електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, досліджувати сонячний енергетичний потенціал. Важливо провести експерименти на лабораторній установці. Визначити робочі параметри, зняти вольт-амперні характеристики та вибрати оптимальні режими роботи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В даний час найбільш широко з відновлюваних джерел енергії (ВІЕ) використовуються гідроелектростанції (ГЕС), вітрогенератори та сонячні електростанції. Найбільшою потужністю володіють гідроелектростанції [1], найпотужнішими з яких є «Три ущелини» (Китай), «Ітайпу» (Бразилія та Парагвай), «Сілоду» (Китай), «Гурі» (Венесуела), «Тукуруї» (Бразилія), «Гранд-Ко-Шуно» (Росія) [2, 3].

Недоліками ГЕС є затоплення великих територій для створення водоймищ, а також небезпека техногенних катастроф, які можуть призвести до великої кількості жертв (вибух Каховської ГЕС 2023 р.) Слід зазначити, що активно розвивається також напрям використання мікроГЕС, в якому ГЕС невеликої потужності використовуються для електропостачання окремих сіл, будинків. Такі мікроГЕС не впливають на навколишнє середовище і не несуть у собі небезпеки техногенних катастроф. Однак утримання та техобслуговування таких невеликих електростанцій пов'язане з певними витратами.

Розглядаючи найбільш широко розвиваються у світовій енергетиці, можна сміливо сказати, що найдинамічніше зростання спостерігається у площині функціонування сонячних електростанцій (СЕС) [4]. СЕС поділяються на кілька типів: тарілчасті, баштові, аеростатні, сонячно-вакуумні, параболоциліндричні концентраторні та комбіновані [5]. Найбільш поширені СЕС на основі фотоелектричних модулів.

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як теплоенергетичного, так і фотоенергетичного обладнання практично в усіх областях. Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в південних областях України – 7 місяців (з квітня по жовтень), в північних областях 5 місяців (з травня по вересень). Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися на протязі всього року [6].

В кліматометеорологічних умовах України для сонячного теплопостачання ефективним є застосування плоских сонячних колекторів, які використовують як пряму, так і розсіяну сонячну радіацію. Концентраторні сонячні колектори можуть бути достатньо ефективними тільки в південних регіонах України.

Достатньо високий рівень готового до серійного виробництва та широкий діапазон можливого застосування в Україні обладнання сонячної теплової енергетики показує, що для масштабного впровадження і отримання значної економії паливно-енергетичних ресурсів необхідно лише підвищення зацікавленості виробників до випуску великих партій такого обладнання.

Перетворення сонячної енергії в електричну енергію в умовах України слід орієнтувати в першу чергу на використання фотоелектричних пристроїв. Наявність значних запасів сировини, промислової та науково-технічної бази для виготовлення фотоелектричних пристроїв може забезпечити сповна не тільки потреби вітчизняного споживача, але й представляти для експортних поставок більше двох третин виробленої продукції.

На рис. 1 приведені енергетичні показники з надходження сонячної радіації є базовими при впровадженні сонячного енергетичного обладнання і рекомендуються до використання в першу чергу

проектувальниками об'єктів сонячної енергетики для вибору типу обладнання (сонячні теплові, фотоелектричні установки) та для встановлення їх оптимальної потужності і терміну ефективної експлуатації обладнання в конкретній місцевості.

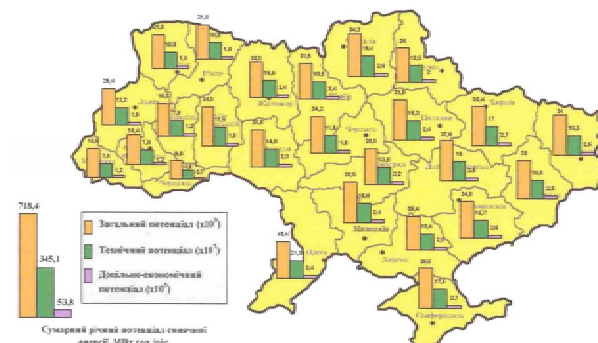


Рис. 1. Потенціал сонячної енергії на території України

З метою підвищення якості підготовки бакалаврів та магістрів напрямків G3 «Електрична інженерія», а також для проведення наукових досліджень аспірантів та викладачів було розроблено лабораторну установку для дослідження сонячних електростанцій. Структурну схему лабораторної установки показано на рис. 2.

Вона складається із двох сегментів. До складу першого сегмента, званого «Сонцем», входять первинне джерело електроживлення (1), електропривод переміщення «Сонця» (2), контролер управління «Сонцем» (3), кероване джерело електроживлення «Сонця» (4), «Сонце» (5). Другий сегмент, званий «Геліостат», включає сонячну панель (12), встановлену на геліостаті, контролер заряду (11), інвертор напруги (8), акумулятор (10), контролер управління (9), електроприводи геліостату (13) і (7) і датчики пошуку.

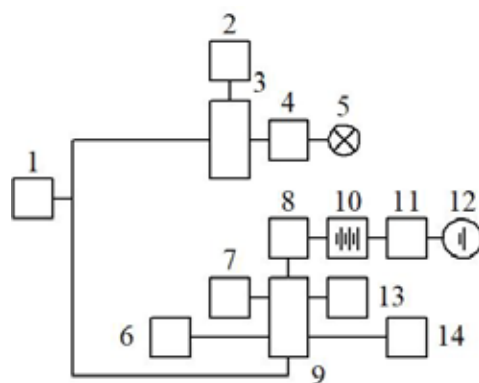


Рис. 2. Структурна схема лабораторної установки

Лабораторна установка призначена для використання у навчальному процесі на кафедрі електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів ННІАЕ НУК ім. адм. Макарова під час підготовки магістрів за програмою «Системи генерування

електроенергії та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами та викладачами кафедри.

Зовнішній вигляд «Геліостата» показаний на рис. 3.

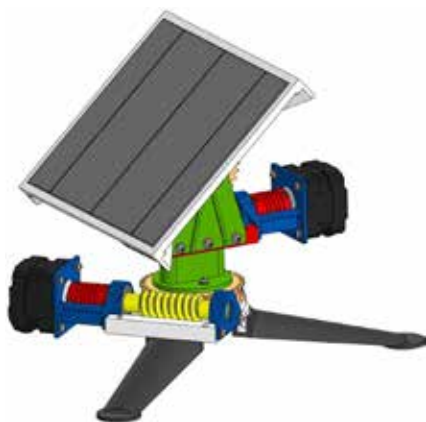


Рис. 3. Зовнішній вигляд «Геліостата»

«Геліостат» є просторовою конструкцією, що складається з несучої платформи і двох приводів на основі крокових двигунів з черв'ячними редукторами. Черв'ячні редуктори забезпечують мінімальні габарити геліостату, забезпечуючи при цьому максимальне передатне відношення. Приводи забезпечують встановлення сонячної панелі в полярних координатах, з точністю $\pm 0,02^\circ$. Застосування черв'ячних редукторів забезпечує фіксацію положення сонячної панелі при зняттю керуючому сигналі на приводах, без застосування додаткових гальмівних пристроїв. Діапазон зміни положення геліостату у горизонтальній площині від 0° до 270° , у вертикальній площині від 0° до 90° . Це дозволяє відстежувати «Сонце» в будь-якій точці напівсфери. Відстеження забезпечується датчиками пошуку, які розташовані навколо сонячної панелі. Точне наведення забезпечується максимум освітленості всіх датчиків. Управління режимами роботи «Геліостата» здійснюється контролером управління. У ньому ж задаються вид дослідницької роботи та первинні дані для роботи фотоелектричного перетворювача.

Як «Сонце» використовується галогенова лампа розжарювання, живлення якої здійснюється через кероване джерело. Вибір типу джерела світла обумовлений тим, що при порівняно невеликих габаритах галогенова лампа забезпечує велику освітленість, маючи при цьому спектр, найбільш наближений до спектру природного світила. Положення джерела забезпечується приводом, однотипним приводом «Геліостата», який переміщає його зубчатою дугоподібною рейкою, тим самим імітуючи положення Сонця протягом світлового дня. Інтенсивність освітленості визначається контролером управління, залежно від положення «Сонця» на рейці.

Всі елементи лабораторного стенду укладені в світлонепроникний ящик (рис. 4) для виключення

впливу зовнішніх джерел світла на експерименти, що проводяться. Зсередини ящик пофарбований чорною матовою фарбою для усунення ефекту відблисків.

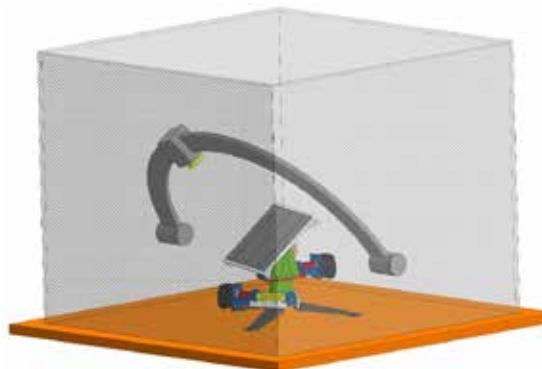


Рис. 4. Зовнішній вигляд лабораторного стенду

Управління положенням «Геліостата» та «Сонця» здійснюється дистанційно, з контролерів управління. На бічну стінку ящика виведено ручку для попередньої установки нахилу траєкторії «Сонця» з метою імітації положення світила в різних широтах. Для спостереження за ходом експерименту всередині скриньки може бути встановлена веб-камера. У верхній частині ящика розташований люк, через який при необхідності експеримент може вводиться контрольний люксметр.

Всі елементи лабораторної роботи виконані з використанням технології 3D-друку, що забезпечує високу ремонтпридатність обладнання, забезпечує високий модернізаційний потенціал та забезпечує високу повторюваність конструкції.

Усі режими роботи установки реалізуються програмним шляхом. Контролери управління пов'язані з ПЕОМ, у якій автоматичному режимі ведеться протоколювання виконуваних досліджень.

Установка дозволяє проводити такі експерименти:

- визначення напруги холостого ходу сонячної панелі;
- визначення струму короткого замикання сонячної панелі;
- зняття вольт-амперних характеристик сонячної панелі;
- вивчення принципу автоматизації роботи геліостата.

Один із базових параметрів сонячних елементів – напруга холостого ходу U_{xx} , яке створює кожен сонячний елемент. Це значення напруги є максимальним і спостерігається при нульовому струмі. Ця напруга чисельно дорівнює прямому зміщенню, що відповідає зміні напруги р-п переходу, що спостерігається в ситуації появи світлового потоку. Необхідно звернути увагу, що U_{xx} окремого елемента може змінюватись від елемента до елемента навіть у межах однієї партії від одного і того ж виробника і може становити близько 0,5 В.

Отже, при складанні сонячних панелей необхідно вибирати осередки з однаковою напругою холостого ходу, інакше кінцеве ККД буде менше розрахункового максимуму. Для виконання лабораторної роботи потрібний стенд із сонячними панелями. У разі різної освітленості значення фото-ЕРС (або U_{xx}) дорівнюють точкам перетину осі напруги та вольт-амперної характеристики. (Фото-ЕРС $\sim 0,50\text{--}0,55$ В для кремнієвого елемента).

Отже, залежно від освітленості (інтенсивності джерела світла) змінюється значення напруги холостого ходу [7].

Досвід проводиться за зміни потужності джерела світла від 30 % до 100 %. Варіюючи значення кожного випробуваного елемента, заповнюється таблиця. У ході виконання лабораторних досліджень напругу холостого ходу слід вимірювати 3 рази.

Напруга холостого ходу також залежить від кута нахилу сонячних елементів, який при 100% інтенсивності світла змінюється від 0° до 90° з кроком 10° .

Таким чином, можна проаналізувати, як змінюється напруга холостого ходу.

Наступний експеримент полягає у визначенні струму короткого замикання сонячних батарей залежно від кута нахилу елемента та інтенсивності джерела світла. Значення струмів короткого замикання ІКЗ відповідають точкам перетину осі струму з вольт-амперною характеристикою. У разі середнього сонячного світла щільність струму короткого замикання для кремнієвих елементів дорівнюватиме $\sim 20\text{--}25$ мА/см².

Це відбувається в результаті генерації та поділу носіїв, що генеруються світлом. Струм короткого замикання у разі розгляду його в ідеальному сонячному елементі, що має помірні резистивні втрати, дорівнюватиме світловому потоку. З цього випливає, що струм короткого замикання може бути розглянутий як максимальний струм, що генерується сонячним елементом. Струм короткого замикання прямо пропорційний інтенсивності світла: при малій освітленості залежність $I_{K3} \sim J$ носить лінійний характер, оскільки струм ІКЗ прямо пропорційний числу електронно-діркових пар, що утворилися:

$$I_{K3} \sim g, \quad (1)$$

де g – кількість електронно-діркових пар, що утворилися.

Спостерігається пряма пропорційність кількості поглинених квантів світла до електронно-діркових пар:

$$g = \eta \alpha J, \quad (2)$$

де α – показник поглинання; J – інтенсивність світла; η – внутрішній квантовий вихід.

Внутрішній квантовий вихід кремнієвих фотодіодів досягає 100. За допомогою експериментального співвідношення $I_{K3}(J)$ можна дізнатися квантову ефективність. Коефіцієнтом корисної дії (ККД) називається

відношення максимальної потужності, що отримується від фотоелемента, до повної потужності світлового потоку, який подається на робочу поверхню:

$$\eta = P_{\max}/P. \quad (3)$$

При вимірі в лабораторії фіксується максимальний можливий струм для сонячного елемента даних умов. Потім програмне забезпечення автоматично знижує навантаження до максимально можливого. Струм короткого замикання в цих умовах фіксують за допомогою амперметра. Досвід проводиться шляхом зміни потужності джерела світла від 30 до 100 %. Кут сонячного елемента при 100 % інтенсивності світла змінюється від 0° до 90° з кроком 10° . Струм короткого замикання необхідно вимірювати 3 рази [8].

Сенс наступного експерименту із сонячними елементами полягає у безпосередньому знятті вольт-амперної характеристики. Ця характеристика є однією з основних, коли йдеться про сонячні елементи. Оскільки робочою областю є зміщена і назад зміщена область р-п переходу, вольтамперна характеристика фотоелемента зазвичай зворотна [9].

Усі типи сонячних елементів ґрунтуються на напівпровідниках і тому є нелінійними пристроями, і закон Ома у лінійній формі до них не застосовується. Отже, використовується графічний метод.

На початку лабораторних вимірювань регулятор потужності джерела світла встановлюється максимум (100 %).

Програмне забезпечення автоматично сканує та відображає інформацію про потужність, що генерується сонячним елементом, як функцію прикладеного навантаження (струму). Відносна похибка графіків, що відображаються, збільшується при низькому освітленні сонячного елемента. Отримані графіки дозволяють визначити максимальну потужність $P_{\max}$, мВт, ефективну напругу $U_{\text{еф}}$, мВ, та ефективний струм $I_{\text{еф}}$, мА [10].

Досвід проводиться за зміни потужності джерела світла від 50 % до 100 %.

Можна вивести залежність та оцінити ефективність перетворення сонячної батареї, яка визначається як відношення за формулою ККД і виглядає наступним чином [11]:

$$\eta = P_{\text{уд.мах}}/P_{\text{пад}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{уд.мах}} = P_{\max}/S$ – максимальна питома потужність сонячного елемента за 100 % інтенсивності джерела світла, Вт/м² [12]; $P_{\text{пад}}$ – Потужність падаючого оптичного випромінювання, дорівнює 60 Вт/м².

ВИСНОВКИ

1. В даний час у всьому світі спостерігається перехід енергетики до використання відновлюваних джерел, таких як енергія сонця, вітру, припливів та відливів, морських хвиль та інших. Так, потужності найбільших сонячних електростанцій – 1,5 ГВт.

2. У зв'язку з цим провідні вузи розпочали підготовку бакалаврів та магістрів за програмами, пов'язаними з проектуванням, монтажем, експлуатацією та обслуговуванням вітрових та сонячних електростанцій. Так, у НУК розпочато підготовку магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії та електропостачання».

3. З метою підвищення якості підготовки магістрів за програмою «Системи генерування електроенергії

та електропостачання», а також для проведення наукових експериментів аспірантами було змонтовано лабораторний комплекс для дослідження сонячних енергетичних установок.

4. У математичному пакеті Matlab Simulink було згенеровано комп'ютерні моделі всіх основних елементів лабораторного комплексу: вітрогенератора, фотоелектричного перетворювача, акумуляторних батарей.

REFERENCES

- [1] Fouz D.M., Carballo R., Lopez I., Igleasias G. (2022) Tidal Stream Energy Potential in the Shannon Estuary. *Renewable Energy*, Vol. 185, pp. 61–74.
- [2] Richardson R.L., Buckham B., McWhinnie L.H. (2022) Mapping a Blue Energy Future for British Columbia: Creating a Holistic Framework for Tidal Stream Energy Development in Remote Coastal Communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 157, pp. 112032.
- [3] Rocha J., Abreu T., Felgueiras C. (2020) Evaluation of Potential Tidal Impoundment Energy Systems in Ria de Aveiro, Portugal. *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 226–230.
- [4] Kan A., Zeng Y., Meng X., Wang D. (2021) The Linkage between Renewable Energy Potential and Sustainable Development: Understanding Solar Energy Variability and Photovoltaic Power Potential in Tibet, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 48, pp. 101551.
- [5] Dezfouli M.M.S., Sopian K., Kadir K. (2022) Energy and Performance Analysis of Solar Solid Desiccant Cooling Systems for Energy Efficient Buildings in Tropical Regions. *Energy Conversion and Management*: X, pp. 100186.
- [6] Medykovskyi M.O. (2001) Ponovliuvalni dzhherela enerhii. [Renewable energy sources.] NU "Lvivska politehnika". [in Ukrainian]
- [7] Lan H., Gou Z., Xie X. (2021) A Simplified Evaluation Method of Rooftop Solar Energy Potential Based on Image Semantic Segmentation of Urban Streetscapes. *Solar Energy*, Vol. 230, pp. 912–924.
- [8] Zhang W., Li Z., Zhang C., Lin Y., Zhu H., Meng Z., Wu D. (2022) Improvement of the Efficiency of Volumetric Solar Steam Generation by Enhanced Solar Harvesting and Energy Management. *Renewable Energy*, Vol. 183, pp. 820–829.
- [9] Reyes A. (2022) Sawdust Drying in a Series of Rectangular Base Spouted Beds Using Solar Energy. *Journal of Energy Storage*, Vol. 48, pp. 103881.
- [10] Yasmeen R., Yao X., Padda I., Shah W. (2022) Exploring the Role of Solar Energy and Foreign Direct Investment for Clean Environment: Evidence from Top 10 Solar Energy Consuming Countries. *Renewable Energy*, Vol. 185, pp. 147–158.
- [11] Tong G., Chen Q., Xu H. (2022) Passive Solar Energy Utilization: A Review of Envelope Material Selection for Chinese Solar Green houses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 50, pp. 101833.
- [12] Rowińska P.A., Veraart A.E.D., Gruet P. (2021) A Multi-Factor Approach to Modelling the Impact of Wind Energy On Electricity Spot Prices. *Energy Economics*, Vol. 104, pp. 105640.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Fouz D.M., Carballo R., Lopez I., Igleasias G. (2022) Tidal Stream Energy Potential in the Shannon Estuary. *Renewable Energy*, Vol. 185, pp. 61–74.
- [2] Richardson R.L., Buckham B., McWhinnie L.H. (2022) Mapping a Blue Energy Future for British Columbia: Creating a Holistic Framework for Tidal Stream Energy Development in Remote Coastal Communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 157, pp. 112032.
- [3] Rocha J., Abreu T., Felgueiras C. (2020) Evaluation of Potential Tidal Impoundment Energy Systems in Ria de Aveiro, Portugal. *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 226–230.
- [4] Kan A., Zeng Y., Meng X., Wang D. (2021) The Linkage between Renewable Energy Potential and Sustainable Development: Understanding Solar Energy Variability and Photovoltaic Power Potential in Tibet, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 48, pp. 101551.
- [5] Dezfouli M.M.S., Sopian K., Kadir K. (2022) Energy and Performance Analysis of Solar Solid Desiccant Cooling Systems for Energy Efficient Buildings in Tropical Regions. *Energy Conversion and Management*: X, pp. 100–186.
- [6] Медиковський М.О. (2001) Поновлювальні джерела енергії. НУ „Львівська політехніка”.
- [7] Lan H., Gou Z., Xie X. (2021) A Simplified Evaluation Method of Rooftop Solar Energy Potential Based on Image Semantic Segmentation of Urban Streetscapes. *Solar Energy*, Vol. 230, pp. 912–924.
- [8] Zhang W., Li Z., Zhang C., Lin Y., Zhu H., Meng Z., Wu D. (2022) Improvement of the Efficiency of Volumetric Solar Steam Generation by Enhanced Solar Harvesting and Energy Management. *Renewable Energy*, Vol. 183, pp. 820–829.
- [9] Reyes A. (2022) Sawdust Drying in a Series of Rectangular Base Spouted Beds Using Solar Energy. *Journal of Energy Storage*, Vol. 48, pp. 103–881.

- [10] Yasmeen R., Yao X., Padda I., Shah W. (2022) Exploring the Role of Solar Energy and Foreign Direct Investment for Clean Environment: Evidence from Top 10 Solar Energy Consuming Countries. *Renewable Energy*, Vol. 185, pp. 147–158.
- [11] Tong G., Chen Q., Xu H. (2022) Passive Solar Energy Utilization: A Review of Envelope Material Selection for Chinese Solar Green houses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 50, pp. 101–833.
- [12] Rowińska P.A., Veraart A.E.D., Gruet P. (2021) A Multi-Factor Approach to Modelling the Impact of Wind Energy On Electricity Spot Prices. *Energy Economics*, Vol. 104, pp. 105–640.

© Бабкін Г. В., Костенко Д. В., Овсянников В. М.
Дата надходження статті до редакції: 20.05.2025
Дата затвердження статті до друку: 05.06.2025