

А. І. Ковальчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
e-mail: andrii.i.kovalchuk@gmail.com

А. А. Сапожнік

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
e-mail: andriisapozhnyiik@gmail.com

ПЛАВУЧІ СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В УКРАЇНІ: ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

<https://doi.org/10.23939/sepes2025.01.088>

© Ковальчук А. І., Сапожнік А. А., 2025

У статті досліджено перспективи застосування плавучих сонячних електростанцій (ПСЕС) як інноваційного рішення для виробництва відновлюваної електроенергії в Україні. Мета дослідження – створення теоретичної та практичної основи для проектування та впровадження ПСЕС на водних об’єктах, що дає змогу істотно підвищити ефективність використання сонячної енергії в специфічних умовах України. Сучасні технології ПСЕС дають можливість розміщувати сонячні панелі на водних поверхнях, таких як озера, річки або водосховища, тому вони ідеальні для використання в районах з обмеженими земельними ресурсами. Окрім економії землі, одна з основних переваг таких систем полягає в ефекті природного охолодження сонячних модулів за рахунок води, що підвищує їхню енергоефективність і збільшує термін служби панелей. Охолодження водою може підвищити ефективність на 5–10 %.

Основною метою цього дослідження є детальна оцінка техніко-економічної доцільності впровадження ПСЕС в Україні, зокрема, оцінювання собівартості виробництва електроенергії через розрахунок LCOE (Levelized Cost of Energy) та порівняння цих даних із традиційними наземними сонячними електростанціями (СЕС). Дослідження виявило, що хоча початкові капітальні витрати на встановлення ПСЕС вищі (550 \$/кВт), порівняно з наземними станціями (350 \$/кВт), вигоди від використання водних ресурсів і підвищеної ефективності компенсують ці додаткові витрати. ПСЕС дають змогу істотно знизити витрати на землю, а також зменшити операційні витрати (O&M). Наприклад, вартість експлуатації ПСЕС – 22 \$/кВт рік, що незначно перевищує витрати на обслуговування традиційних СЕС (20 \$/кВт рік).

Загалом, результати цього дослідження засвідчують великий потенціал ПСЕС для розвитку в Україні. Технології плавучих сонячних електростанцій сприяють зростанню енергетичної незалежності країни, зниженню операційних витрат, збереженню земель-

них та водних ресурсів, а також мінімізації впливу на навколишнє середовище. Враховуючи важливість забезпечення сталого розвитку та зменшення викидів CO₂, ПСЕС можуть стати важливим елементом екологічно чистої енергетичної стратегії України в майбутньому.

Ключові слова: відновлювана енергія, плавучі сонячні електростанції, фотоелектричні модулі, екологічний аналіз, техніко-економічна ефективність, сталий розвиток.

Вступ

З початком війни в Україні серйозно постраждала енергетична інфраструктура, зокрема теплоелектростанції, що спричинило тривалі перебої в постачанні електричної енергії, а також загострення проблеми енергетичної безпеки. Оскільки чимало із цих об'єктів зазнали пошкоджень або були знищені, Україна змушена шукати нові способи відновлення енергетичної стабільності. Крім того, війна виявила слабкість централізованих енергетичних систем, що не здатні ефективно функціонувати в умовах постійних загроз. Зважаючи на це, Україна активно рухається до децентралізації енергетики, що дає змогу зменшити залежність від великих теплових та атомних електростанцій, підвищити енергонезалежність та стійкість енергосистеми загалом [1]. Вагому роль у цьому процесі може відігравати використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Одним із перспективних напрямів є упровадження плавучих сонячних електростанцій (ПСЕС), які, на відміну від традиційних сонячних станцій, можуть розміщуватися на водних об'єктах, що дає змогу істотно знизити витрати на землю та зберегти природні ресурси. ПСЕС не тільки сприяють енергетичній незалежності, але й забезпечують природне охолодження сонячних панелей завдяки контакту з водною поверхнею, що підвищує їхню ефективність та збільшує термін служби. Особливо актуальні ПСЕС для України, враховуючи її велику кількість водосховищ та річок. Системи, що використовують водні площі для встановлення фотоелектричних модулів, можуть стати не лише рішенням для забезпечення стабільного електропостачання у регіонах, де наземні сонячні станції неможливо побудувати через обмеження у земельних ресурсах, але й вирішенням проблеми збереження водних ресурсів. До того ж ПСЕС дають можливість знижувати рівень випаровування води на 30–50 %, що позитивно впливає на водний баланс [2]. Необхідність такого підходу стає ще очевиднішою в умовах війни, коли традиційні енергетичні системи зазнають ризиків. Відновлення та розбудова інфраструктури із використанням ВДЕ, зокрема ПСЕС, відкривають нові перспективи для формування сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього України.

Огляд літературних джерел

ПСЕС стали важливим рішенням для подолання проблеми обмежених земельних ресурсів, необхідних для традиційних сонячних електростанцій. Встановлення сонячних панелей на водних об'єктах, таких як озера, водосховища, ставки та канали, дає змогу істотно зменшити витрати на землю і використовувати воду для природного охолодження сонячних панелей, що підвищує їхню ефективність. Ці технології стають все актуальнішими у контексті розвитку відновлюваної енергетики. Економія земельних ресурсів особливо важлива для густонаселених регіонів, де земля є обмеженим ресурсом. ПСЕС дають змогу використовувати водні площі для виробництва енергії, що знижує конкуренцію з іншими видами землекористування, такими як сільське господарство чи будівництво [3]. Вода, що випаровується із водної поверхні, знижує температуру сонячних панелей, що підвищує їхню ефективність. Наприклад, дослідження показують, що ПСЕС можуть мати до 16 % більшу продуктивність порівняно із традиційними наземними системами завдяки охолодженню водою [4]. Крім того, встановлення сонячних панелей на водних об'єктах дає змогу зменшити випаровування води з водосховищ та обмежити ріст водоростей, що позитивно впливає на водні екосистеми. Це також допомагає знизити температурний режим води у водосховищах [5]. Попри високі початкові витрати на встановлення ПСЕС, ці системи можуть бути вигідними в

довгостроковій перспективі. Вартість їх встановлення на 4–8 % більша порівняно із традиційними наземними сонячними електростанціями, але це компенсується економією на землі та експлуатаційних витратах, а також підвищенням ефективності завдяки охолодженню водою [6].

Поряд із перевагами, ПСЕС притаманні виклики і технічні проблеми. У роботі [5] вказано на можливі ризики для водних екосистем, у яких можливі порушення через встановлення ПСЕС. Це питання потребує додаткових досліджень для мінімізації негативного впливу на біорізноманіття та водні ресурси. Для встановлення ПСЕС на великих водних об'єктах необхідні спеціальні конструкції, такі як платформи з високою плавучістю, здатні витримувати важкі навантаження від сонячних панелей. Крім того, необхідно забезпечити надійне кріплення панелей, щоб уникнути їх переміщення через хвилі чи сильний вітер [6]. Все це створює додаткові технічні проблеми.

Перспективним напрямом є інтеграція ПСЕС з іншими ВДЕ, такими як гідроелектричні станції, вітрові електростанції або водневе паливо. Такі гібридні системи можуть істотно підвищити ефективність та економічну вигідність проєктів. Наприклад, поєднання ПСЕС із гідроелектричними станціями є одним із найперспективніших варіантів для забезпечення стабільного й ефективного енергопостачання [7]. Отож, ПСЕС мають значний потенціал для подальшого розвитку в умовах зростання попиту на відновлювану енергію.

Мета і завдання роботи

Мета роботи – створення детальної концепції ПСЕС, із технічним, економічним та екологічним обґрунтуванням їх впровадження в українських умовах, а також оцінювання їх впливу на ефективність вироблення зеленої енергії.

Завдання дослідження такі:

1. Аналіз ефективності вироблення електроенергії із моделюванням роботи ПСЕС. Це завдання передбачає створення комп'ютерних моделей для оцінювання технічних характеристик ПСЕС, таких як їхня продуктивність, надійність та тривалість роботи в різних кліматичних умовах України. Моделювання дасть змогу визначити оптимальні параметри для роботи таких станцій, що забезпечить їхню ефективність і зменшить ризики від природних факторів, таких як зміни температури води чи коливання сонячної інтенсивності.

2. Виконання техніко-економічного аналізу із розрахунком рівня собівартості електроенергії (LCOE): Для оцінювання економічної доцільності впровадження ПСЕС необхідно виконати детальний розрахунок рівня собівартості виробленої електроенергії. Він охоплюватиме аналіз витрат на встановлення, експлуатацію та обслуговування ПСЕС, а також порівняння їх із традиційними джерелами енергії. Оцінювання LCOE дасть змогу з'ясувати економічну вигідність цієї технології та її конкурентоспроможність на ринку.

3. Оцінювання впливу ПСЕС на водні екосистеми та локальний мікроклімат: Встановлення ПСЕС на водних об'єктах може зумовити значний екологічний вплив, тому важливо оцінити можливі зміни в екосистемах водосховищ, річок та інших водних ресурсів. Це завдання охоплює вивчення впливу покриття водної поверхні сонячними панелями на водний баланс, температуру води, а також на біорізноманіття. Додатково буде здійснено оцінювання впливу на локальний мікроклімат, зокрема на температуру повітря та вологість, що важливо для планування таких установок.

4. Розроблення методів для оптимізації впливу на екологічні та соціальні аспекти. Важливим аспектом є урахування соціальних і екологічних факторів під час впровадження ПСЕС. Оцінювання соціальних ефектів від використання водних ресурсів для енергетичних потреб, а також аналізування потенційних змін у місцевих громадах дадуть змогу виявити можливі конфлікти та забезпечити гармонійний розвиток проєктів.

Обґрунтування рішення

Орієнтація панелей за схемою “схід – захід” (рис. 1), яка поширюється останнім часом, дає змогу рівномірно розподіляти вітрові навантаження по обох сторонах конструкції, що знижує

ймовірність механічних пошкоджень та деформацій фотоелектричних модулів (ФЕМ). Це особливо важливо для ПСЕС, оскільки вітрові навантаження можуть відчутно впливати на стабільність плавучих платформ. Дослідження показують, що така орієнтація зменшує вітровий опір, а це дає змогу зменшити кількість якорів та знижує загальні витрати на інфраструктуру [3]. Орієнтація “схід – захід” забезпечує достатній кут нахилу панелей для ефективного зсування снігу, що мінімізує його накопичення на поверхні та знижує додаткові навантаження на конструкцію. Це особливо актуально для регіонів із помірним кліматом, де зимові снігопади можуть призводити до високих втрат на виробництво енергії. Згідно з дослідженнями, снігове навантаження може призводити до річних втрат виробництва електроенергії від 1 % до 12 %, залежно від умов навколишнього середовища [4]. Орієнтація “схід – захід” дає змогу досягти балансу між ефективністю вироблення енергії та експлуатаційною надійністю. Хоча загальна добова генерація може бути дещо нижчою порівняно із південною орієнтацією, така схема забезпечує рівномірніше вироблення енергії протягом дня, зокрема в ранкові та вечірні години, коли попит на електроенергію часто вищий. Це дає змогу зменшити пікові навантаження на енергомережу та підвищити економічну ефективність проекту [5]. Плавуча сонячна електростанція на водосховищі Alqueva в Португалії – приклад успішного впровадження орієнтації “схід – захід”. Річна генерація цієї станції, з орієнтацією панелей “схід – захід” та нахилом 5°, становить близько 7,5 GWh. Вона забезпечує електроенергією близько 1500 родин. Орієнтація панелей дає змогу зменшити тіні між рядами та забезпечує рівномірніше вироблення енергії упродовж дня, що підвищує ефективність та знижує витрати на технічне обслуговування [6].



Рис. 1. Розташування ФЕМ за схемою “схід – захід” [8]

Основні елементи конструкції та принцип роботи

На рис. 2 наведено приклад кріплення ФЕМ на пластикову плавучу конструкцію [8]. Використано сонячний модуль PV Module – ФЕМ, який перетворює сонячну енергію на електричну. Його закріплюють на головних поплавках Main Floater – основної плавучої платформи, на якій розміщують сонячні панелі. Поплавок має спеціальні місця для кріплення панелей та сполучення із іншими поплавками. Поплавок для обладнання Equipment Floater – допоміжний модуль, призначений для розміщення інверторів, комутаційного обладнання чи кабельних коробок. Довгий прохід Long Aisle – елемент, що забезпечує зручний доступ для обслуговування та пересування між рядами панелей. Короткий прохід Short Aisle – короткий сегмент доступу, використовується для оптимізації розташування та обслуговування. Набір кінцевих затискачів End Clamp Kit – металеві або пластикові елементи, що фіксують краї сонячних панелей до головного поплавка. Використано комплекти пластикових кріплень Plastic Fastener Kit 1 і Kit 2: Kit 1 складається з пластикової гайки та болта для з’єднання поплавків між собою; Kit 2 – додатковий комплект із кільцем та складнішою геометрією кріплення, що забезпечує надійність конструкції у зонах із підвищеним навантаженням. Основні

поплавки формують платформу, на якій сонячні панелі встановлюють під необхідним кутом. Додаткові проходи (aisles) дають змогу технічному персоналу пересуватися по платформі. Всі поплавки з'єднані між собою пластиковими кріпленнями, утворюють єдину жорстку конструкцію, здатну витримувати вітрові та хвильові навантаження.

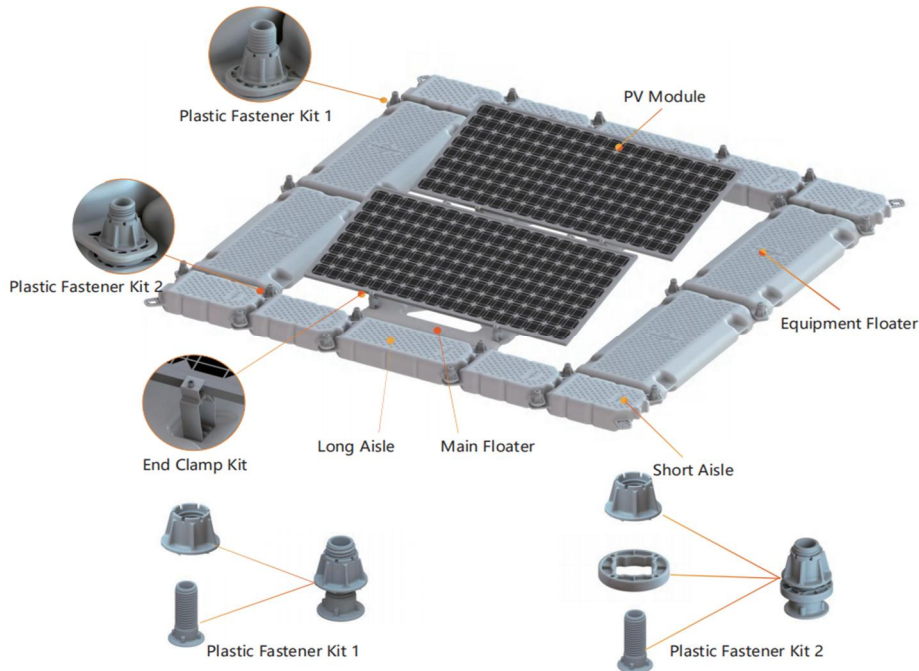


Рис. 2. Приклад кріплення ФЕМ на пластикову плавучу конструкцію [8]

Схематичне зображення ПСЕС

На рис. 3 наведено приклад ПСЕС [9], на якому вказано компоненти ПСЕС. Lightning Protection System – система блискавкозахисту (заземлення металевих елементів кріплення сонячних модулів). PV Modules – сонячні панелі, розміщені на поплавках або понтонах. Floats or Pontoons – поплавки або понтони, які утримують всю конструкцію на поверхні води. Anchoring – система якорів для фіксації платформи в заданій позиції та запобігання її знесенню вітром чи течією. Mooring Lines – швартові канати, що з'єднують платформу із якорями. Combiner Box – коробка з'єднання, у якій об'єднують електричні виходи від груп сонячних панелей перед подаванням на інвертор. Central Inverter – центральний інвертор (може бути розміщений на плавучій платформі або на березі), який перетворює постійний струм на змінний. Underwater Cables – підводні кабелі для передавання електроенергії на берег. Connections to Other Floating Solar PV Arrays – з'єднання з іншими масивами плавучих сонячних панелей (у випадку модульних станцій). Transmission – лінії електропередач, які відправляють електроенергію до споживачів. Transformer – трансформатор для підвищення напруги перед передаванням по магістральних мережах. Сонячна панель Solar Panel – фотомодуль, який виробляє електроенергію. Гоплавков Floater – пластиковий або композитний блок, який забезпечує плавучість панелі. З'єднувач Connector – елемент, що фіксує поплавки та утворює єдину платформу. Платформа FPV platform – конструкція, зібрана з окремих поплавків і сонячних модулів. Система якоріння Anchoring system – набір канатів і вантажів, які утримують платформу на місці навіть в умовах хвиль та вітру.

Загальний принцип роботи ПСЕС є таким. Сонячні панелі закріплені на поплавках, які з'єднані між собою у велику платформу. Платформа прив'язана до дна водойми за допомогою якірної системи. Електроенергія від панелей подається до інверторів, відтак на суматорну шафу і через підводні кабелі – на берег, проходить через трансформатор і надходить у мережу.

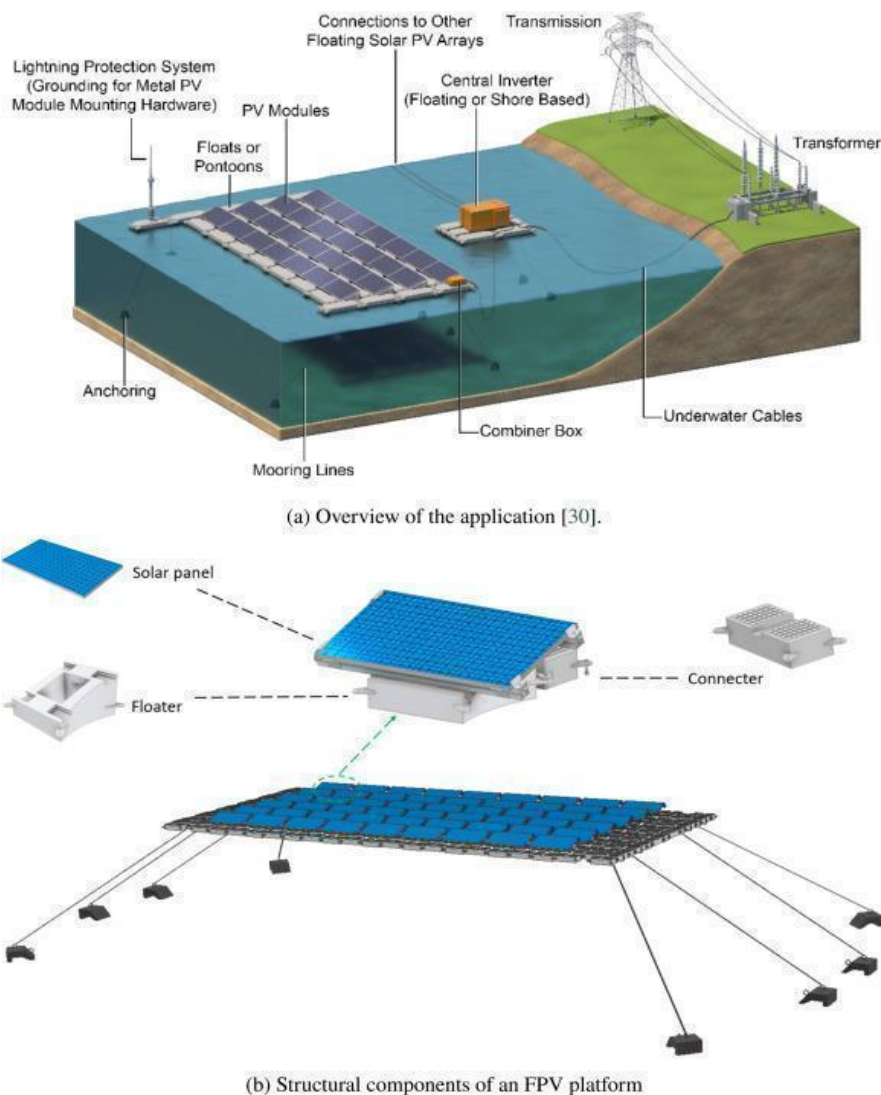


Рис. 3. Схематичне зображення ПСЕС [10]

Основні етапи розрахунку в прикладному пакеті PVGIS

Прикладний програмний продукт PVGIS [11] використовує історичні кліматичні дані (GHI, DNI, DHI) із супутникових баз PVGIS-SARAH, ERA5 тощо. Моделі R.sun і s.vol.rst враховують рельєф, атмосферну турбідність та альбедо ($\sim 0,15$) [3]. Для корекції щодо нахиленої поверхні виконується трансформація випромінювання для площини панелей з урахуванням кута нахилу та азимута. Застосовують анізотропні моделі для дифузної та променевої складових світла. Для планування втрат для ФЕМ враховують: відбивання та кут падіння світла (2–4 %), спектральні ефекти залежно від технології, а також температурні втрати, обчислені за моделлю Faiman (2008). Визначаючи системні втрати, враховують втрати інвертора, кабельні втрати, розбіжності між модулями та старіння ($0,5\%$ /рік). Типові початкові системні втрати – близько 14 %.

Симуляція часових рядів. PVGIS обчислює вироблення електроенергії погодинно на основі багаторічних даних (наприклад, за 15 років) та може формувати Typical Meteorological Year (TMY) відповідно до ISO 15927-4. Це дає змогу отримувати реалістичні результати для різних періодів і умов, щоб дати точні прогнози для кожного проєкту [9].

Виведення результатів. Для мережових систем надають середньорічні та місячні показники вироблення енергії, бюджет втрат і варіабельність виробництва. Для автономних систем враховують роботу батарей та втрати через переповнення чи розряд [12].

Потужність генерації електричної енергії в PVGIS обчислюють за виразом

$$P = \left(\frac{G}{1000} \right) A \eta, \quad (1)$$

де P – потужність, що генерується ФЕМ, Вт; G – інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на панелі, Вт/м²; A – сумарна площа ФЕМ, м²; $\eta(G, T_m)$ – ефективність перетворення сонячної енергії на електричну, з урахуванням значення G , а також температури панелей T_m .

Для прикладу використання продукту PVGIS на рис. 4 подано гістограму помісячного генерування електроенергії еталонною станцією із розміщенням ФЕМ за системою “схід – захід” потужністю 13,8 кВт, яка розташована на території Західної України.

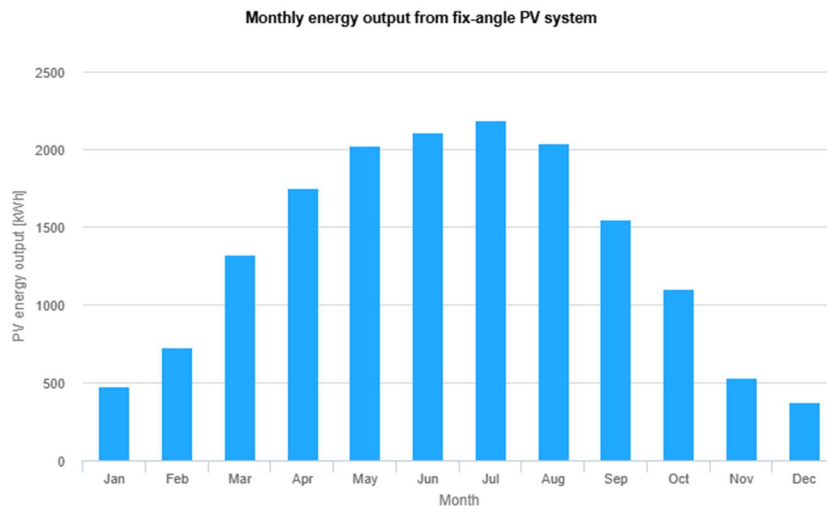


Рис. 4. Прогнозоване річне виробництво електроенергії

Методи економічного та екологічного аналізу

Економічний аналіз – важливий етап оцінювання доцільності впровадження ПСЕС, оскільки дає змогу визначити їх економічну вигідність та порівняти собівартість виробленої електроенергії з традиційними джерелами. Одним із основних інструментів є розрахунок рівня собівартості електроенергії (LCOE, Levelized Cost of Energy), що враховує всі основні витрати на будівництво, експлуатацію та обслуговування ПСЕС. Розрахунок LCOE охоплює: капітальні затрати (CAPEX), пов’язані з початковими інвестиціями у будівництво ПСЕС, зокрема закупівлю та встановлення сонячних панелей, платформ, інверторів, системи з’єднань та інших інфраструктурних компонентів; операційні витрати (OPEX), які виникають під час експлуатації станції, урахуваючи обслуговування, ремонти, оплату праці, витрати на перевірки та моніторинг, а також витрати на управління енергетичною системою. Зазвичай термін експлуатації ПСЕС становить 25–30 років. Це важливо врахувати, оцінюючи тривалість періоду, протягом якого будуть генеруватися доходи від продажу електричної енергії. Дисконтну ставку застосовують для приведення всіх витрат та доходів до теперішньої вартості. Врахування дисконтної ставки дає змогу правильно оцінити економічну вигідність проекту, особливо в контексті часу та інфляції. Рівень інфляції враховує змінні витрати, які можуть зростати із часом, зокрема, витрати на обслуговування, енергетичні ресурси, матеріали та робочу силу. Врахування інфляції дає змогу точніше прогнозувати довгострокові інвестиції. Розрахунок LCOE дає змогу порівняти собівартість електроенергії, що виробляє ПСЕС, з іншими джерелами енергії, зокрема з традиційними СЕС на суші. Це допомагає оцінити, чи є впровадження ПСЕС економічно вигідним і конкурентоспроможним.

Екологічний аналіз – це оцінювання екологічного впливу ПСЕС, яке є необхідною складовою дослідження, оскільки важливо врахувати можливі зміни в екосистемах водних об’єктів

після їх встановлення. Екологічний аналіз враховує кілька основних факторів. Це передусім зміна рівня випаровування води після встановлення ПСЕС. Один із ефектів встановлення сонячних панелей на водних об'єктах – зменшення випаровування води, оскільки панелі покривають частину водної поверхні. Це може дати позитивний ефект у регіонах, де існує проблема нестачі води або високі рівні випаровування, але в інших випадках може впливати на водні ресурси [3]. Також це вплив на температурний режим води та локальний мікроклімат. ПСЕС можуть впливати на температурний режим води в резервуарах або водосховищах, оскільки панелі зменшують кількість сонячного випромінювання, що потрапляє на воду. Це може призводити до зниження температури води, що, своєю чергою, впливає на біорізноманіття та гідрологічний баланс [5]. Однак в умовах спекотного клімату це може бути перевагою для охолодження води та запобігання надмірному нагріванню водних ресурсів. Ще одним аспектом екологічного аналізу є оцінювання впливу на фотосинтез водних організмів. Плавучі панелі змінюють освітлення під водою, що може впливати на фотосинтез водних рослин та організмів, які потребують сонячного світла для життєдіяльності. Тому важливо здійснювати моніторинг того, як зміна інтенсивності освітлення під водою впливає на екосистеми та організми, що мешкають у цих водоймах [6]. Завдяки такому комплексному екологічному аналізу можна визначити, наскільки впровадження ПСЕС буде безпечним для навколишнього середовища і чи існують потенційні негативні наслідки для водних екосистем.

Результати розрахунків для конкретного прикладу

Для прикладу досліджено конкретну ПСЕС, розміщену в Україні, з такими параметрами: площа водойми 100 га; покриття ПСЕС 100 % цієї площі. Розглянуто два варіанти щільності заповнення водойми ФЕМ: 500 кВт/га (загальна потужність 50 МВт) і 1000 кВт /га (загальна потужність 100 МВт).

Вихідні дані для розрахунку ми взяли середньостатистичними для території України. Річний чинник вироблення електроенергії становив: 1200 кВт·год/кВт/рік. ПСЕС дає додаткову генерацію через охолоджувальний ефект: +5 % (консервативно) та +10 % (оптимістично). Для порівняння економічних показників капітальні затрати на спорудження сонячних станій взяли такими: наземна СЕС 350 \$/кВт; ПСЕС 550 \$/кВт, відповідно. Експлуатаційні затрати та затрати на обслуговування (О&М): наземна СЕС 20 \$/кВт рік, ПСЕС 22 \$/кВт на рік. Період експлуатації становив 25 років; деградація панелей 0,5 %/рік; дисконтна ставка (базова) 8 %. Ціна електроенергії для оцінювання доходів: 4,32 грн/кВт·год. Курс валюти: 1 \$ = 41,25 грн.

На основі наведених вхідних даних виконано розрахунки.

Річне виробництво електроенергії (кВт·год) визначали за таким виразом:

$$E(t) = E_0 (1 + B) (1 - D)^t, \quad (2)$$

де E_0 – базове виробництво енергії в початковому році, кВт·год; B – бонус продуктивності, встановлений на рівні 0,05 і 0,10, або 5 і 10 %; D – деградація панелей, її значення 0,005 або 0,5 % за рік; t – кількість років, за які обчислюється виробництво.

У результаті розрахунку за виразом (2) для розглянутого прикладу отримано $E_{сес}$ 500 кВт/га = 60 МВт·год, $E_{псес}$ 500 кВт/га +5 % = 63 МВт·год, $E_{псес}$ 500 кВт/га +10 % = 66 МВт·год, $E_{сес}$ 1000 кВт/га = 120 МВт·год, $E_{псес}$ 1000 кВт/га +5 % = 126 МВт·год, $E_{псес}$ 1000 кВт/га +10 % = 132 МВт·год. Порівняння річної генерації для досліджуваних варіантів ПСЕС без та з урахуванням бонуса під час експлуатації показано на рис. 5.

Річний дохід оцінювали так:

$$R(t) = E(t) p(t), \quad (3)$$

де $R(t)$ – річний дохід, отриманий від виробництва електроенергії, доларів США, \$; $E(t)$ – кількість електроенергії, виробленої у t -му році, кВт·год; $p(t)$ – тариф на електроенергію в t -му році, \$/кВт·год.

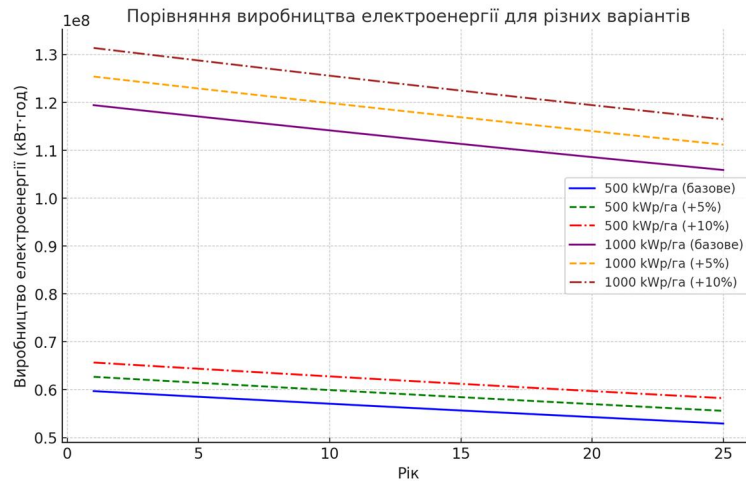


Рис. 5. Річне виробництво електроенергії

У результаті розрахунку за виразом (3) на рис. 6 відображено вплив прогнозованого зростання тарифу на електроенергію на річний дохід під час експлуатації ПСЕС для досліджуваних варіантів.

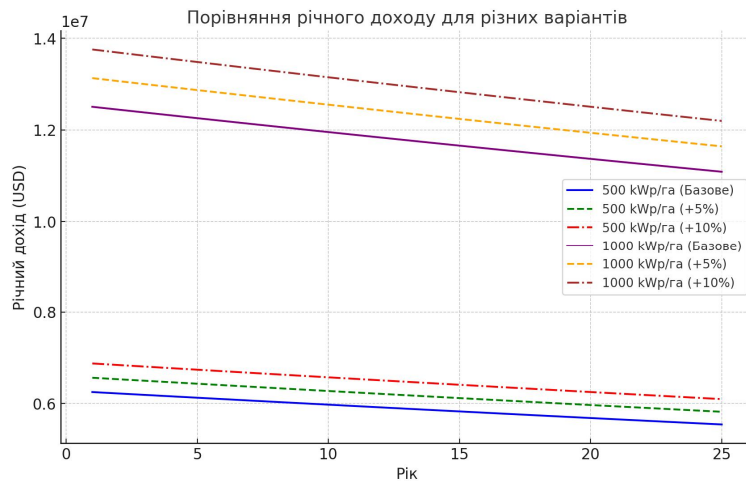


Рис. 6. Річний дохід, \$

Річні експлуатаційні витрати (O&M) на t -й рік обчислювали за виразом

$$C(t) = C_0 (1 + infl)^t, \quad (4)$$

де C_0 – початкові витрати на обслуговування та ремонт (в USD або іншій валюті); $infl$ – коефіцієнт інфляції або зростання витрат на обслуговування, який відображає збільшення витрат із часом (наприклад, 3 % або 0,03).

На рис. 7 відображено вплив рівня інфляції на електроенергію на річні експлуатаційні витрати протягом терміну експлуатації ПСЕС для досліджуваних варіантів у результаті розрахунку за виразом (4).

Чистий прибуток у t -му році після відрахування податків оцінювали за виразом

$$Net(t) = R(t) - C(t) - Tax(t), \quad (5)$$

де $Tax(t)$ – податок на прибуток, \$.

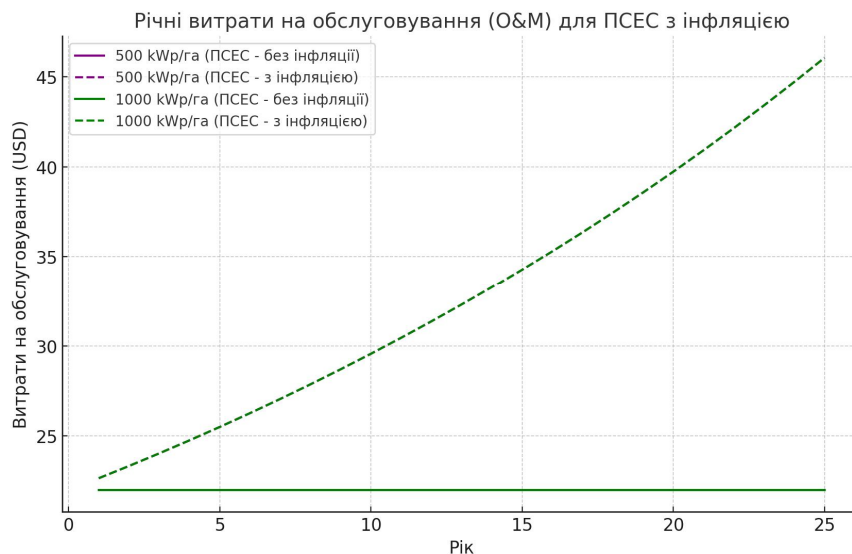


Рис. 7. Річні експлуатаційні витрати на **O&M**

На рис. 8 подано залежності чистого річного прибутку під час експлуатації ПСЕС для досліджуваних варіантів у результаті розрахунку за виразом (5).

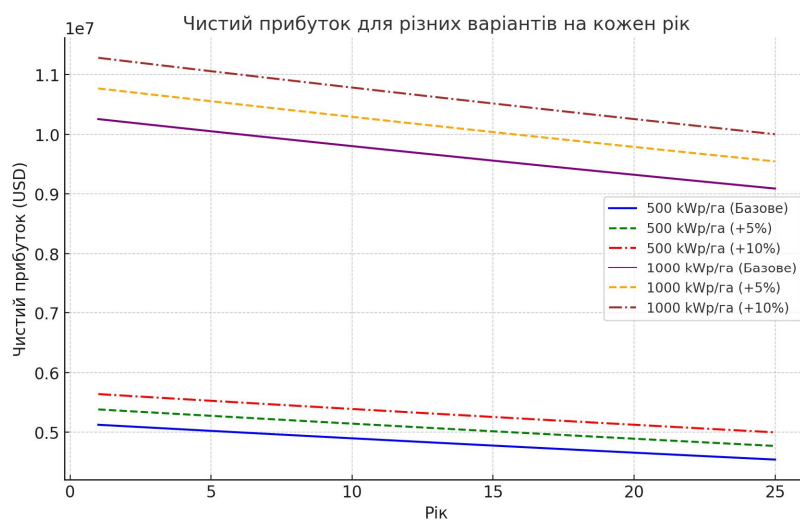


Рис. 8. Чистий прибуток після податків

Собівартість генерованої ПСЕС електроенергії (LCOE), \$/кВт·год, розраховано за виразом

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=0}^T \frac{C(t)}{1000}}{\sum_{t=0}^T \frac{P(t)}{1000}}, \quad (6)$$

де $CAPEX$ – початкові капітальні витрати (Capital Expenditures); $\sum_{t=0}^T \frac{P(t)}{1000}$ – загальний обсяг електроенергії, виробленої протягом усього періоду експлуатації; 1000 – коефіцієнт для переведення, кВт·год.

У результаті розрахунку за виразом (6) для ПСЕС отримано 1000 кВт/га $LCOE = 0,022$ \$/кВт·год.

Собівартість електроенергії з урахуванням ефективності охолодження для ПСЕС та СЕС

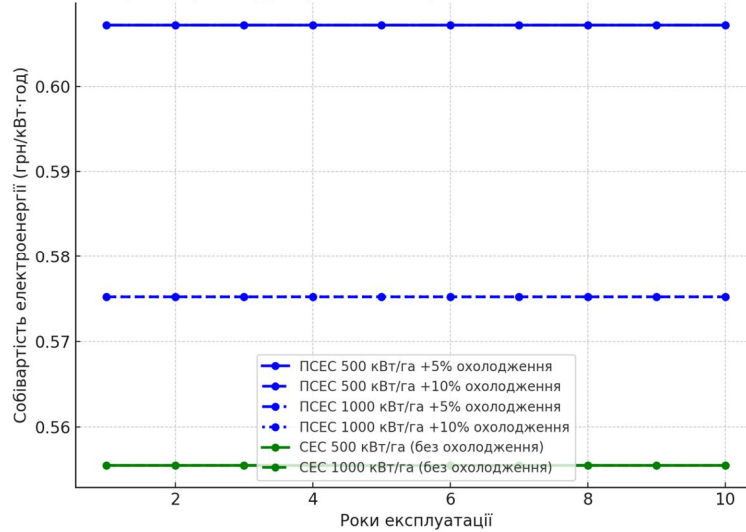


Рис. 9. Собівартості електроенергії (LCOE)

З екологічних показників розраховували уникнені викиди CO₂:

$$CO_2 = \sum_{t=0}^T \left(\frac{P(t)}{1000} \right) \cdot CO_{2_per_MWh}, \quad (7)$$

де $CO_{2_per_MWh}$ – кількість викидів CO₂ на 1 МВт·год електроенергії.

У результаті розрахунку за виразом (7) для прикладу, що розглядається, одержано для ПСЕС 1000 кВт/га CO₂ = 1 417 тис кг CO₂.

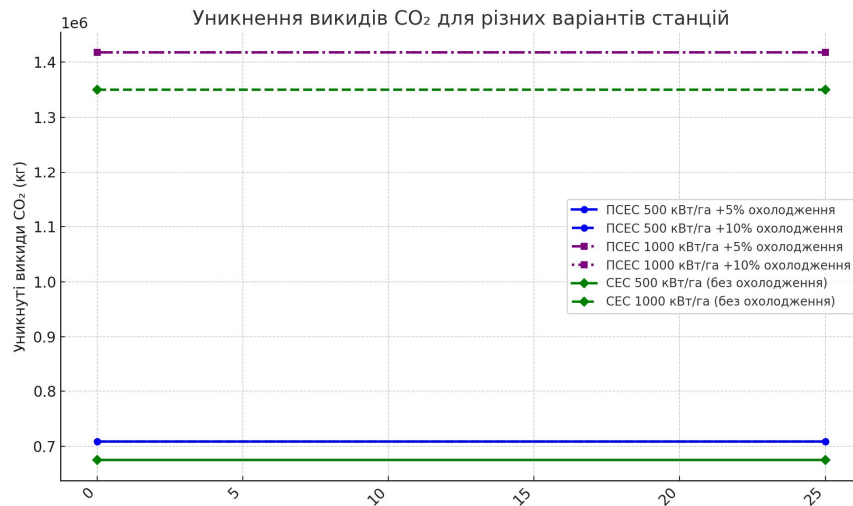


Рис. 10. Викиди CO₂

Висновки

Дослідження дає підставу для певних висновків. Перспективна технологія ПСЕС є ефективним та екологічно безпечним рішенням для виробництва електроенергії в Україні, оскільки дає змогу використовувати водні простори та знижувати залежність від земельних ресурсів. Природне охолодження за рахунок контакту із водою сприяє підвищенню ефективності ФЕП, що в підсумку збільшує щоденне вироблення електроенергії.

У межах техніко-економічного аналізу виконано серію розрахунків для ПСЕС, зокрема, визначено рівень LCOE та економічні вигоди від використання ПСЕС. Розрахунки показали, що вартість електроенергії, виробленої ПСЕС, – на рівні традиційних наземних СЕС, незважаючи на вищі капітальні затрати. У довгостроковій перспективі ця вартість може бути значно нижчою за рахунок підвищеної енергоефективності та довгострокових переваг від природного охолодження. Прогнозоване річне виробництво електроенергії для ПСЕС з щільністю 500 кВт/га за оптимальних умов може становити 66 МВт·год, що на 10 % більше порівняно із традиційними СЕС. Це означає, що ПСЕС здатні істотно збільшити енергетичну продуктивність за порівняно низьких експлуатаційних витрат.

Мінімальний негативний вплив на водні екосистеми, зниження випаровування води та позитивний вплив на локальний мікроклімат роблять ПСЕС важливим елементом екологічної політики.

Напрямок подальших досліджень – виконання реального пілотного проєкту, що передбачає моніторинг довгострокового впливу ПСЕС на водні ресурси та розроблення стандартів проєктування таких систем.

Список літератури

1. Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system>
2. Як енергетична ситуація в Україні сприяє зеленому енергетичному майбутньому. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://www.responsible-investor.com/comment-how-ukraines-energy-emergency-is-powering-a-greener-future/?utm_source=chatgpt.com
3. Solomin E., Sirotkin E., Cuce E., Selvanathan S. P., Kumarasamy S. Hybrid Floating Solar Plant Designs: A Review. *Energies*, 2021, 14, 2751.
4. Essak L., Ghosh A. Floating Photovoltaics: A Review. *Clean Technol.*, 2022, vol. 4, p. 752–769.
5. Ghosh A. A Comprehensive Review of Water-Based PV: Flotovoltaics, Underwater, Offshore & Canal Top. *Ocean Engineering*, 2023, Vol. 281, 115044.
6. Garrod A., Hussain S. N., Aritra Ghosh A., Nahata S., Wynne C., Paver S. An Assessment of Floating Photovoltaic Systems and Energy Storage Methods: A Comprehensive Review. *Results in Engineering*, 2024, Vol. 21, 101940.
7. Cosgun A. E., Demir H. Investigating the Effect of Albedo in Simulation-Based Floating Photovoltaic System: 1 MW Bifacial Floating Photovoltaic System Design. *Energies*, 2024, Vol. 17, 959.
8. In 2017 Solar Float designed and installed the largest floating solar array in the Netherlands at De Krim Resort. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.solarfloat.com/en-us/floating-pv-systems>
9. Panel Sistem Pemasangan Struktur. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Findonesian.alibaba.com%2Fproduct-detail%2FNew-Design-Mount-Float-Power-Plant-1600278224332.html&psig=AOvVaw0iBZTGDzpn7qdD-7-BTk42&ust=1758985089883000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCMiJ6Z3Y9o8DFQAAAAAdAAAAABB0>
10. An interdisciplinary literature review of floating solar power plants. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124008207>
11. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
12. Solar Panel Orientation and the Impact on Energy Efficiency. Renewable Energy World. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.renewableenergyworld.com/solar/solar-panel-orientation-and-the-impact-on-energy-efficiency/>

**FLOATING SOLAR POWER STATIONS IN UKRAINE:
TECHNO-ECONOMIC AND ECOLOGICAL ANALYSIS**

© Kovalchuk A. I., Sapozhnik A. A., 2025

The article explores the prospects of using floating solar power stations (FSPPS) as an innovative solution for renewable energy production in Ukraine. The aim of this study is to create a theoretical and practical foundation for designing and implementing FSPPS on water bodies, which significantly enhances the efficiency of solar energy use in the specific conditions of Ukraine. Modern FSPPS technologies allow for the placement of solar panels on water surfaces, such as lakes, rivers, or reservoirs, making them ideal for use in areas with limited land resources. In addition to land savings, one of the main advantages of these systems is the natural cooling effect of the solar modules due to the water, which improves their energy efficiency and extends the lifespan of the panels. Water cooling can increase efficiency by 5–10 %.

The main goal of this study is to provide a detailed evaluation of the techno-economic feasibility of implementing FSPPS in Ukraine, particularly the assessment of electricity production costs through the calculation of LCOE (Levelized Cost of Energy) and the comparison of these data with traditional land-based solar power stations (SPS). The study revealed that although the initial capital costs of installing FSPPS are higher (550 \$/kW) compared to land-based stations (350 \$/kW), the benefits from using water resources and increased efficiency offset these additional costs. FSPPS allow for a significant reduction in land costs and a decrease in operational expenses (O&M). For example, the cost of operating FSPPS is 22 \$/kW per year, which only slightly exceeds the maintenance costs of traditional SPS (20 \$/kW per year).

Overall, the results of this study show the great potential of FSPPS for development in Ukraine. Floating solar power technologies contribute to increasing the country's energy independence, reducing operational costs, preserving land and water resources, and minimizing the environmental impact. Considering the importance of ensuring sustainable development and reducing CO₂ emissions, FSPPS could become an important element of Ukraine's clean energy strategy in the future.

Keywords: *renewable energy, floating solar power stations, photovoltaic modules, ecological analysis, techno-economic efficiency, sustainable development.*