

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ХІМІЇ ТА ЕКОЛОГІЇ
Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

Дипломна робота магістра

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: СТАН
ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Виконала:

студентка II курсу

спеціальності 101 Екологія

Щербанич Анастасія Василівна

Керівник:

к. х.н, доц. Мільович С.С.

Рецензент:

д.х.н. проф. Барчій І.Є.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	6
1.1. Історія розвитку сонячної енергетики.....	6
1.2. Зміни в сонячній енергетиці та технологіях.....	10
1.3. Негативні наслідки.....	17
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	24
2.1. Статистичні дані кількості сонячних електростанцій в Україні та Закарпатті за останні роки.....	24
2.2. Вплив сонячних панелей на об'єкти навколишнього середовища.....	30
2.3. Динаміка цін за останні роки.....	32
2.4. Правила техніки безпеки.....	39
2.5. Характеристика проведення дослідження.....	40
РОЗДІЛ 3 ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	42
3.1. Результати опитування.....	42
ВИСНОВКИ.....	50
РЕЗЮМЕ.....	52
SUMARY.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом останніх років загострилося питання ефективного й раціонального використання природних ресурсів, особливо у сфері енергетики. Одним із ключових рішень у цьому напрямку є розвиток сонячної енергетики та вдосконалення технологій, що сприяють підвищенню енергоефективності й зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Сьогодні світ зіткнувся з низкою викликів, які впливають на стабільність розвитку цивілізації: забруднення екосистем, вичерпання природних ресурсів, надмірні витрати на видобуток енергетичної сировини, а також проблеми з відходами від промисловості та сільського господарства. Це обумовлює інтенсивний розвиток альтернативних методів енергозабезпечення, зокрема сонячної енергетики, що здатна мінімізувати негативні наслідки для природи й передбачити довгострокові рішення для сталого розвитку.

Досвід країн ЄС та Північної Америки демонструє, що сонячна енергія може успішно використовуватися в промислових масштабах навіть у нічний час. В Іспанії та США працюють підприємства, які виробляють електроенергію в темний період доби завдяки теплу, накопиченому протягом дня [1].

В умовах сучасних економічних і політичних викликів Україна стикається з необхідністю забезпечення стабільної енергетичної безпеки. Тому перспектива розвитку сонячної енергетики набуває особливого значення. Використання сонячної енергії може стати важливою складовою енергетичної незалежності країни та сприяти економічному й соціальному прогресу. Незважаючи на ряд переваг сонячної енергетики, вона не є повністю екологічно безпечною, що і обумовлює **актуальність роботи**.

У Закарпатській області попит на енергетичні ресурси значно зріс, оскільки на тлі воєнних дій багато підприємств перенесли свою діяльність на захід України. Унікальне географічне положення, рельєф і клімат Закарпаття, зокрема сприятливий рівень сонячної активності, створюють сприятливі умови

для розвитку сонячної енергетики, яка тут має високий потенціал для розширення та ефективного використання.

Сонячна енергетика разом із вітровою та гідроенергетикою має всі шанси стати основою для відновлювальної енергетики в регіоні, забезпечуючи нові робочі місця, енергетичну стабільність і екологічно чисте майбутнє для Закарпаття та всієї країни.

Метою дипломної роботи є аналіз сучасного стану та динаміки розвитку сонячної енергетики в умовах технологічного прогресу, а також вивчення впливу екологічних факторів на впровадження і використання сонячних технологій в Україні, зокрема в Закарпатській області.

Відповідно до мети були сформовані такі **завдання**:

1. Дослідити історію розвитку сонячної енергетики та основні зміни у технологіях, що сприяли її поширенню.
2. Проаналізувати вплив сонячних панелей на об'єкти навколишнього середовища, враховуючи як позитивні, так і негативні наслідки.
3. Вивчити динаміку поширення сонячних електростанцій за останні роки та фактори, що впливають на цей процес.
4. Проведення онлайн опитування населення, щодо впливу технологічного процесу на використання сонячної енергетики, та ставлення населення до даної технології.

Об'єктом дослідження виступає сонячна енергетика та її вплив на довкілля в контексті сучасного використання та перспектив розвитку цієї галузі.

Предметом дослідження є екологічні аспекти, пов'язані з виробництвом, експлуатацією та утилізацією сонячних панелей, а також інноваційні технології, що сприяють зниженню впливу на довкілля та підвищенню стійкості сонячної енергетики, відношення населення до даного типу ВДЕ.

Зв'язок роботи із ініціативною кафедральною темою: Робота виконана на кафедрі Екології та охорони навколишнього середовища ДВНЗ «Ужгородський національний університет» у межах комплексної теми

«Розробка та вдосконалення систем і методів моніторингу об'єктів довкілля в контексті екологічної безпеки».

Методи дослідження: загальний аналіз теоретичних даних, анкетування, узагальнення результатів опитування та дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі обробки результатів дослідження було проведено комплексну оцінку екологічних аспектів сонячної енергетики на всіх етапах її життєвого циклу — від виробництва та встановлення сонячних панелей до їх утилізації. Визначено інноваційні підходи до зниження екологічного впливу, а також розроблено рекомендації щодо впровадження технологій, які сприяють мінімізації впливу на довкілля та збільшенню ефективності використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в контексті сталого розвитку.

Практичне значення одержаних результатів. Визначено основні технологічні іновачії, які мають значний вплив на розвиток і використання сонячної енергетики. На основі результатів дослідження сформульовано пропозиції та рекомендації, спрямовані на стимулювання впровадження сучасних сонячних технологій і підвищення їх популярності серед населення та бізнесу.

Особистий внесок здобувача. Разом з науковим керівником Мільович С.С. визначили та інтерпретували наукову спрямованість цілей і завдань дослідження, обговорили, узагальнили результати та сформулювали загальні висновки. Збір та обробка літературних даних, що є основною частиною дослідницької частини, опрацювання отриманих результатів та формулювання загальних висновків виконані самостійно.

Загальну теоретичну частину роботи було проведено на кафедрі екології та охорони навколишнього середовища ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Експериментальну частину (опитування) проведено онлайн.

Апробація роботи: Основні результати роботи були викладені на II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Комплексне використання ресурсів довкілля» (20 листопада 2024 р., м. Дрогобич)

Структура роботи: Дипломна робота на 57 сторінках, складається з вступу, 3 розділів, резюме, summary, висновків, списку використаних літературних джерел (35 найменувань), містить 24 рисунки.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Історія розвитку сонячної енергетики

Концепція використання сонячної енергії бере свій початок XII столітті до нашої ери, коли люди розпалювали вогнища за допомогою сонячного світла та збільшувальних стекол. Греки та римляни використовували «палаючі дзеркала», які відбивали світло для запалювання смолоскипів під час релігійних церемоній, а подібні методи застосовували в Китаї у 20 столітті н.е. У 1700-х і 1800-х роках мореплавці використовували сонячне світло для розпалювання печей під час подорожей, а також були винайдені сонячні пароплави [2].

Винахід технології сонячних електростанцій.

Перші спроби зрозуміти та використати сонячну енергію виникли в науковому середовищі ще в XIX столітті, і розвиток цієї технології вийшов за межі загальноприйнятих методів та стандартних рішень.

1839 року французький фізик Едмон Беккерель відкрив фотоефект, коли світло збільшує електричний струм у провідному середовищі. Цей ефект став першим кроком до створення технології перетворення сонячного світла в електрику. Дослідження Беккереля заклали основи для розвитку фотоелектричних систем.

У 1876 р. Вільям Гріллс Адамс і Річард Еванс Дей виявили, що селен генерує електрику під впливом світла, довівши, що можна виробляти електроенергію з одного лише сонячного світла, без рухомих частин.

1883р. американський винахідник Чарльз Фріцро зробив перший справжній селеновий сонячний елемент. Хоча він був менш ефективним, це був перший великий крок до розробки комерційних сонячних панелей.

1905р. Альберт Ейнштейн запропонував пояснення фотоефекту в рамках своєї квантової теорії і згодом отримав Нобелівську премію з фізики в 1921 році. Його робота зробила значний внесок у розуміння основних принципів фотовольтаїки [3].

У лабораторії. Bell Labs 1954р Дерріл Чапін, Келвін Фуллер і Джеральд Пірсон розробили перший кремнієвий фотоелемент, здатний перетворювати

сонячне світло в електрику з ефективністю 4%. Це був перший великий прорив у технології сонячної енергетики, завдяки якому більшість кремнієвих фотоелементів стали значно ефективнішими, ніж селенові, які досліджувалися паралельно.

Цей прорив у Bell Labs став основою для створення перших сонячних панелей, які згодом будуть використовуватися для живлення невеликих пристроїв і супутників у космосі. За останнє десятиліття технологія вдосконалювалася, підвищуючи ефективність сонячних панелей і знижуючи їхню вартість.

На початку XXI століття розвиток кремнієвих сонячних елементів значно прискорився, і сьогодні сонячні панелі можуть досягати ефективності понад 20%, що робить сонячну енергію одним з найперспективніших ВДЕ для побутового та промислового використання.

Однак для повноцінного впровадження сонячної енергії в побутові та промислові системи важливу роль відіграє не тільки ефективність панелей, але й здатність ефективно зберігати отриману енергію.

Винахід акумуляторної батареї

Шлях до сучасної акумуляторної технології розпочався понад 200 років тому, і цей процес супроводжувався численними експериментами, відкриттями та інноваціями:

У 1780-х роках італійський фізик Луїджі Гальвані заклав основи вивчення електрохімічних процесів, коли помітив, що м'язи жаби скорочуються під впливом двох різних металів. Цей ефект, пізніше названий «гальванізмом», став кроком до розуміння електричних явищ в органічних і неорганічних матеріалах.

1800р. італійський вчений Алессандро Вольта винаходить першу справжню батарею-вольтів стовп. Він складався з цинкових і мідних пластин, замочених у солоній воді. Вольтів стовп став першим пристроєм, здатним генерувати стабільний постійний струм, і проклав шлях для розвитку електрохімії.

1801р.німецький фізик Йоганн Вільгельм Ріттер розвинув ідею Вольта і створив гальванічну батарею, яку можна було перезаряджати після розряду. Це стало прототипом для подальшого розвитку акумуляторних батарей.

1859 р. французький фізик Гастон Плант розробив першу свинцево-кислотну акумуляторну батарею. Цей тип акумуляторів використовується і сьогодні, особливо в автомобільній промисловості. Свинцево-кислотні акумулятори були революційними на той час завдяки своїй високій ємності та можливості багаторазового використання.

1899 р. Шведський хімік Вальдемар Юнгнер винайшов нікель-кадмієвий (NiCd) акумулятор. Нікель-кадмієві акумулятори мали вищу щільність енергії, ніж свинцево-кислотні, і могли витримувати більше циклів заряджання-розряджання. Їх використовували в багатьох галузях, зокрема в авіації та портативній електроніці.

1960-ті винайдення нікель-метал-гідридних(NiMH) акумуляторів стало наступним важливим кроком у розвитку акумуляторних технологій. Вони мали більшу, ніж нікель-кадмієві батареї, і були менш шкідливими для навколишнього середовища. NiMH-батареї стали популярними в портативній електроніці та в автомобільній промисловості, особливо в гібридних транспортних засобах [4].

1970-тих роках почалися перші дослідження літій-іонних акумуляторів, після чого вчені почали шукати легші та потужніші рішення для зберігання енергії. Літій, легкий та електрохімічно активний метал, привернув увагу дослідників.

У 1991р Sony розробляє першу комерційну літій-іонну батарею. Вона швидко завоювала популярність завдяки високій щільності енергії, тривалому терміну служби та легкості. Літій-іонні акумулятори зробили революцію у світі електроніки, дозволивши пристроям бути значно меншими та легшими, зберігаючи при цьому високу ємність.

У 2019 році Джон Б. Гуденаф, М. Стенлі Віттінгем та Акіра Йошино отримали Нобелівську премію з хімії за розробку літій-іонного акумулятора.

Літій-іонні акумулятори використовуються в широкому спектрі пристроїв, від смартфонів до електромобілів.

Сучасні технології акумуляторів.

Сьогодні літій-іонні акумулятори вважаються найкращим варіантом для зберігання енергії, особливо в системах з сонячними панелями. Це пов'язано з їхньою високою щільністю енергії, легкою вагою, швидкою зарядкою та довговічністю. Однак дослідники продовжують вивчати нові технології, які можуть підвищити ефективність зберігання енергії та зменшити вплив на навколишнє середовище:

Твердотільні акумулятори-один з найперспективніших напрямків розвитку акумуляторних технологій. Ці батареї використовують тверді матеріали замість рідких електролітів для досягнення більшої безпеки та ще більшої щільності енергії [5].

Технологія іонно-натрієвих акумуляторів є дешевшою альтернативою літій-іонним батареям, адже натрій є більш поширеним і дешевим елементом. Іонно-натрієві акумулятори мають великий потенціал для зберігання енергії у великомасштабних проектах, таких як електростанції на відновлюваних джерелах енергії [5]. Таким чином, розробки в галузі акумуляторних технологій не тільки дозволяють ефективно зберігати енергію від сонячних джерел, але й створюють можливості для подальшого розширення використання відновлюваних джерел енергії в глобальній електроенергетичній системі.

На даний час найбільшого поширення у сонячній енергетиці мають LiFePO_4 акумулятори.

1.2.Зміни в сонячній енергетиці та технологіях

За останні десятиліття технологія сонячних панелей значно розвинулася, дозволяючи впроваджувати неймовірні інновації. До прогресу відносяться підвищення ефективності сонячних елементів, впровадження нових і більш поширених матеріалів, удосконалення технологій виробництва та гнучкі конструкції. Ці нові технології сонячних панелей роблять сонячні фотоелектричні системи більш доступними та ефективними.

За останні роки ефективність сонячних панелей значно зросла. У перші дні широкого використання ефективність перетворення сонячних панелей становила близько 10%, і лише близько 10% захопленого сонячного світла можна було перетворити на корисну електроенергію. Однак постійні дослідження, розробки та технічний прогрес збільшує продуктивність сонячних панелей.

Сьогодні технології виробництва сонячних панелей настільки просунулися вперед, що ефективність перетворення енергії в панелях перевищує 20% або навіть 25%. Це означає, що близько 25% сонячного світла, отриманого фотоелектричною системою, можуть бути перетворені в чисту відновлювану енергію. То електричні системи більш доступними та ефективними.

Вища продуктивність сонячної енергетики робить її більш ефективним і привабливим варіантом для власників будинків, підприємств і міст в цілому, оскільки зменшує площу необхідну для сонячних панелей, що дає змогу виготовляти більше електроенергії з тієї ж кількості сонячного світла. Підвищення ефективності зменшила вартість сонячної енергії, зробивши її доступнішою для ширшого загалу та сприяє широкому впровадженню сонячної енергії в усьому світі. Вартість сонячних панелей значно знизилася за останні десятиліття, і стає все важче знайти шляхи для подальшого здешевлення виробництва сонячних панелей. Проте популярність та доступ до сонячних модулів має провідне значення для їх універсального використання. На сьогоднішній час майже всі сонячні панелі виготовляються з кремнію. Однак перовскітові сонячні батареї стають перспективною альтернативою завдяки їхній

низькій вартості виробництва та високому коефіцієнту корисної дії (ККД), що дозволяє потенційно підвищити ефективність енергетичних систем [6].

Перовскіти — це напівпровідниковий матеріал, відомий своєю кристалічною структурою, що нагадує мінерали перовскіт. Перовскітні напівпровідники можуть ефективно перетворювати сонячне світло в електрику завдяки своїй здатності поглинати широкий діапазон довжин хвиль, включаючи видимий і ближній інфрачервоний спектр. Його недорогий і відносно простий виробничий процес, а також постійні дослідження, спрямовані на підвищення його сонячної ефективності та стабільності, позиціонує його як потенційну зміну правил гри в галузі відновлюваної енергетики поряд з традиційними напівпровідниками на основі кремнію [6,7].

Тандемні перовскіт-кремнієві сонячні елементи є унікальною різновидною технологією, яка створює кристалічний кремній із шаром перовскіту. У такій конструкції кремнієва підкладка ефективно поглинає довгохвильове випромінювання, тоді як перовські оптимально забезпечать поглинання короткохвильового світла, забезпечуючи вищу ефективність перетворення енергії [7].

Вчені з Університету Колорадо в Боулдері представили новий метод виробництва перовскітних елементів, що є потенційно критично важливою подією для комерціалізації сонячних технологій наступного покоління. Ця інновація в технологіях виробництва може відіграти вирішальну роль у прогресі та більш широкому впровадженні перовскітних сонячних елементів [8].

Попри значний потенціал перовскітних сонячних панелей, наші певні виклики, які потрібно подолати для їх масового комерційного впровадження. Науковці та дослідники зосереджені на підвищеній стабільності та забезпечують масштабованість цієї технології. Вирішивши ці проблеми, перовскітні сонячні елементи можуть змінити правила гри в галузі відновлюваної енергетики, пропонуючи економічно вигідну та ефективну альтернативу традиційним сонячним панелям на основі кремнію.

Двосторонні сонячні панелі

Двосторонні сонячні панелі мають виняткову перевагу у виробництві електроенергії через те, що здатні вловлювати сонячне світло як з фронтальної, так і з тильної сторони модуля. Завдяки такій інноваційній конструкції вони ефективно зможуть відбити світло від різноманітних поверхонь, як-от землі, води чи навколишнього приміщення, що дозволяє підвищити загальну продуктивність системи [9].

Останні досягнення в технології біфазних сонячних панелей сприяли зростанню їхньої частки на ринку в секторі відновлюваної енергетики. Світовий ринок біфазних сонячних панелей зазнав помітного зростання завдяки таким факторам, як збільшення попиту на екологічно чисту енергію, підвищення ефективності, зниження витрат та екологічні переваги.

Багатофункціональність та продуктивність біфазних сонячних панелей створюють їх особливо цінними для різноманітних компонентів — від комерційних фотоелектричних систем до масштабних сонячних ферм, що зрештою забезпечує економічну привабливість сонячної енергетики. Наразі дослідники з Національної лабораторії відновлюваної енергетики (NREL) працюють над розробкою біфазних перовскітних сонячних елементів, ще більше розширюючи можливості цієї передової технології нового покоління [6,10].

Переваги двосторонніх сонячних панелей:

- Вищий енергетичний вихід. Ці панелі здатні вловлювати світло з обох сторін, що забезпечує більший рівень виробництва електроенергії зі стандартними фотоелектричними панелями.
- Довговічність. Двосторонні панелі спроектовані для роботи в складних умовах довкілля, а багато моделей демонструють високі показники надійності за даними рейтингу PVEL 2024.
- Покращений вихід енергії в спеціальних умовах. Вони ефективно працюють у регіонах зі своїм покривом або на поверхнях із високою здатністю відбивання світла.

- Вища ефективність при розсіяному світлі. Ці панелі здатні продукувати енергію з розсіяного або відбитого світла, що робить їх ідеальними для хмарної погоди або умов недостатнього освітлення.
- Універсальність застосування. Двосторонні сонячні панелі підходять для використання на дачах, автомобільних навісах, а також у плавучих сонячних електростанціях.

Недоліки двосторонніх сонячних панелей:

1. Вища вартість. Двосторонні панелі коштують дорожче, ніж традиційні, що може збільшити загальні витрати на об'єкт.
2. Складність монтажу. Для ефективної роботи необхідно встановити спеціальні конструкції, які забезпечують доступ до світла до обох сторінок, що ускладнює процес інсталяції та споживає витрати.
3. Естетичні обмеження. Прозорий дизайн панелей може бути не всім до вподоби, особливо для власників житлової чи комерційної нерухомості.
4. Накопичення пилу та бруду. Відкрита задня поверхня панелей більш забруднена до забруднення, що потребує частішого очищення й технічного обслуговування.
5. Чутливість до затінення. Через особливості конструкції панелі вразливі до затінення, тому правильне планування установки є критичним для зменшення цього впливу [6-10].

Гнучкі технології сонячних панелей.

Безперервний розвиток матеріалів і технологій виробництва посприяв створенню гнучких, тонших і легких сонячних панелей, які можна використовувати в найрізноманітніших умовах. Ці інноваційні сонячні панелі адаптуються і підходять для широкого спектру застосувань, від живлення мобільних пристроїв до безшовної установки на вигнутих поверхнях.

Науковці з Массачусетського технологічного інституту (MIT) створили сонячний матеріал, схожий на лист, розробивши надлегкі сонячні елементи, які тонші за волосину і можуть бути легко прикріплені до будь-якої поверхні. Вагою в соту частину звичайної сонячної панелі виробляючи на кілограм у 18 разів

більше енергії, ці елементи знаходяться в авангарді останніх розробок в області сонячних панелей [11].

Розробка гнучких та легких сонячних панелей трансформувала використання відновлюваної енергії та зробила революцію в її інтеграції в наше повсякденне життя. Гнучкість сонячних панелей дозволяє нетрадиційне розміщення, наприклад, інтеграцію в одяг або рюкзаки, а їхня легка конструкція відкриває можливість встановлення в широкому діапазоні конструкцій, включаючи транспортні засоби, будівлі і навіть космічні апарати [12].

Оптимізація відновлюваної енергії за допомогою систем зберігання енергії

У 2024 році інтеграція систем зберігання енергії та сонячних панелей знає значного прогресу та оновлень. Однією з важливих сфер є розробка більш досконалих технологій акумуляторів, спеціально розроблених для зберігання сонячної енергії, таких як літій-іонні та акумулятори на основі рідких електролітів. Ці батареї відрізняються вищою енергетичною щільністю, довшим терміном служби та покращеними можливостями заряджання і розрядження, що дозволяє ефективніше використовувати збережену сонячну енергію.

Очікується, що вдосконалені системи управління батареями покращать перевірку і поліпшення методів зберігання енергії. Ці системи дозволять користувачам використовувати накопичену сонячну енергію найбільш ефективно, залежно від попиту, стану мережі або цін на час використання, що в кінцевому підсумку зекономить кошти та підвищить енергоефективність.

Очікується, що на додаток до технологічного прогресу, інтеграції сонячних панелей і систем зберігання енергії також сприятиме вдосконалення державної політики та нормативно-правових актів. Уряди та комунальні підприємства по всьому світу все більше визнають цінність і потенціал зберігання енергії для підтримки інтеграції відновлюваної енергетики та стабільності енергосистеми. Як наслідок, очікується, що у 2024 році з'являться більш сприятливі стимули та програми підтримки для встановлення сонячних панелей та систем зберігання

енергії, що сприятиме їх широкому впровадженню в індустрію чистої енергетики.

Поява прозорих сонячних панелей - це значний крок вперед у створенні сталої інфраструктури, зберігаючи при цьому світлопроникність і видимість. Ці інноваційні панелі використовують новітні технології сонячних панелей через фотоелектричні (PV) системи, що полегшує їх безшовну інтеграцію в архітектурні формування, такі як вікна та екстер'єри будівель. Завдяки використанню фотоелектричного скла, яке підтримує прозорість, ці панелі виконують дві функції : поліпшення візуальної привабливості будівель і водночас генерують відновлювані енергетичні ресурси[13].

Розвиток прозорих сонячних панелей є інноваційним рішенням, яке вдало завдяки функціональності з естетикою. Ці панелі здатні уловлювати сонячну енергію, при цьому пропускаючи природне світло та зберігаючи краєвиди. Завдяки цій будівлі стають одночасно енергоефективними та архітектурно привабливими. Незалежно від того, чи йдеться про сучасні хмарочоси чи житлові будинки, прозорі сонячні панелі демонструють гармонійне поєднання дизайну й технологій, відкриваючи шлях до більш екологічного та сталого майбутнього [14].

«Розумні» сонячні панелі підвищують ефективність і продуктивність.

Зростаюча інтеграція технології інтелектуальних сонячних панелей, включаючи датчики і можливості віддаленого керування, революціонує сонячну енергетику завдяки цій новій технології сонячних панелей. Така інтеграція дозволяє забезпечити якісний моніторинг, обслуговування та оптимізацію роботи сонячних панелей, що в результаті призводить до підвищення їх ефективності та продуктивності [13-15].

Впровадження інтелектуальних технологій в сонячні панелі значно підвищує ефективність і термін служби фотоелектричних модулів. Цей прогрес сприяє більш проактивному і оперативному підходу до виробництва сонячної енергії, закладаючи основи для нової технології інтелектуальних сонячних

панелей і взаємопов'язаної енергетичної інфраструктури з підвищеною продуктивністю і стійкістю.

Завдяки аналітиці даних та автоматизації, «розумні» сонячні панелі можуть змінити своє положення, відстежувати сонячне світло та активно вирішувати складності, в процесі виробництва енергії, максимізуючи виробництво енергії і забезпечуючи надійність сонячних фотоелектричних систем. Така інтеграція інтелектуальних технологій підвищує загальну ефективність сонячних панелей і прокладає шлях до більш взаємопов'язаної та інтелектуальної енергетичної екосистеми. Завдяки постійному вдосконаленню, розгортання інтелектуальних сонячних панелей має великий потенціал для широкого впровадження відновлюваної енергетики та прискорення використання сонячних фотоелектричних технологій [16,17].

1.3. Негативні наслідки для довкілля.

Очевидним є той факт, що сонячна енергія не є досконалою чи ідеально чистою. Тому, сонячна енергія не позбавлена недоліків. Основними з яких є:

1. Попит на енергію.

Виробництво сонячної енергії потребує великої кількості енергії. Видобуток, виробництво і транспортування матеріалів для сонячної енергетики потребують великої кількості енергії. Кварц має бути оброблений, очищений і виготовлений разом з іншими компонентами (алюміній, мідь тощо), які постачаються з інших заводів, щоб створити єдиний сонячний модуль. Для нагрівання кварцу на етапі обробки потрібні дуже високі температури. Виробництво сонячних панелей потребує з'єднання кількох матеріалів із значною точністю для досягнення високої ефективності. Цей процес вимагає значних енергетичних витрат на початкових етапах.

2. Хімічні речовини.

Небезпечні хімічні речовини зазвичай використовуються при обробці напівпровідників у виробництві кремнію для сонячних батарей. В залежності від виробника сонячних панелей і країни походження, ці хімічні речовини можуть утилізуватися належним чином, а можуть і не бути утилізованими. Як і в будь-якій галузі, деякі компанії проявляють ініціативу, а інші намагаються заощадити. Не всі компанії утилізують хімікати або переробляють побічні продукти належним чином.

3. Переробка.

Переробка сонячних панелей поки що не є серйозною проблемою, але в найближчі десятиліття сонячні панелі потребуватимуть заміни. Наразі сонячні модулі можна утилізувати разом з іншими звичайними електронними відходами. У країнах, де немає надійної системи утилізації електронних відходів, існує високий ризик виникнення проблем з переробкою.

Хімічні речовини сонячних елементів, переробка та утилізація.

Переробка та утилізація сонячних елементів є одними із важливих питань. Існують чіткі проблеми, і рішення вже є.

Кремнієві пластини стандартних сонячних модулів зазвичай інкапсульовані в етилацетат (EVA). Даний шар забезпечує захист кремнієвій пластині. Якщо модуль не утилізується належним чином і не застосовуються певні умови тестування, може відбутися деяке вилуговування. За нормальних умов використання ці речовини не виділяються. Сонячна енергія є дуже ефективним засобом скорочення викидів вуглекислого газу. Як і у випадку з усіма технологіями, необхідно утилізувати не навмисні відходи та побічні продукти [18].

Зрозумілим вирішенням цієї проблеми є переробка панелей та продаж їх основних елементів. Теоретично це можливо але не є масштабним та економічно вигідним рішенням.

Альтернативними або додатковими рішеннями для економії на переробці було б введення оплати виробниками сонячних панелей для полегшення процесу переробки або запровадження обов'язкової програми переробки виробниками. Обидва варіанти потребують часу для впровадження та вдосконалення.

Економіка переробки сонячних панелей буде покращуватися, оскільки все більше сонячних панелей виходять з ужитку.

Простим рішенням проблеми хімічних речовин, що використовуються в сонячних панелях, був би пошук альтернативних методів виробництва модулів. Над цим рішенням вже працюють, але час комерціалізації важко передбачити.

Хоча у виробництві сонячних панелей використовуються хімічні речовини, порівняння з традиційними видами палива дає корисний контекст. Використання хімічних речовин у ланцюжку поставок має важливе значення для великомасштабного виробництва енергії.

Вугілля потребує хімічного очищення та обробки після видобутку, в той час як природний газ – ні. І вугілля, і газ використовують для виробництва електроенергії шляхом їх спалювання. Атомна енергетика, у своєму випадку, потребує обробки та викликання радіоактивними матеріалами, що вимагає особливої уваги до безпеки та захисту навколишнього середовища.

Жодне джерело палива не є досконалим, і кожне з них має свої екологічні переваги та недоліки, але деякі з них кращі за інші.

Вплив виробництва сонячних панелей на довкілля.

Сонячні панелі складаються з кількох основних компонентів, зокрема рами, елементів, задньої панелі, захисної плівки, провідників і кришки із загартованого скла (рис. 1.1.). Рама автоматично виготовляється з алюмінію, фотоелементи — з кремнію, провідники — з міді, а задній шар і захисна плівка переважно складаються з полімерних або пластикових матеріалів.

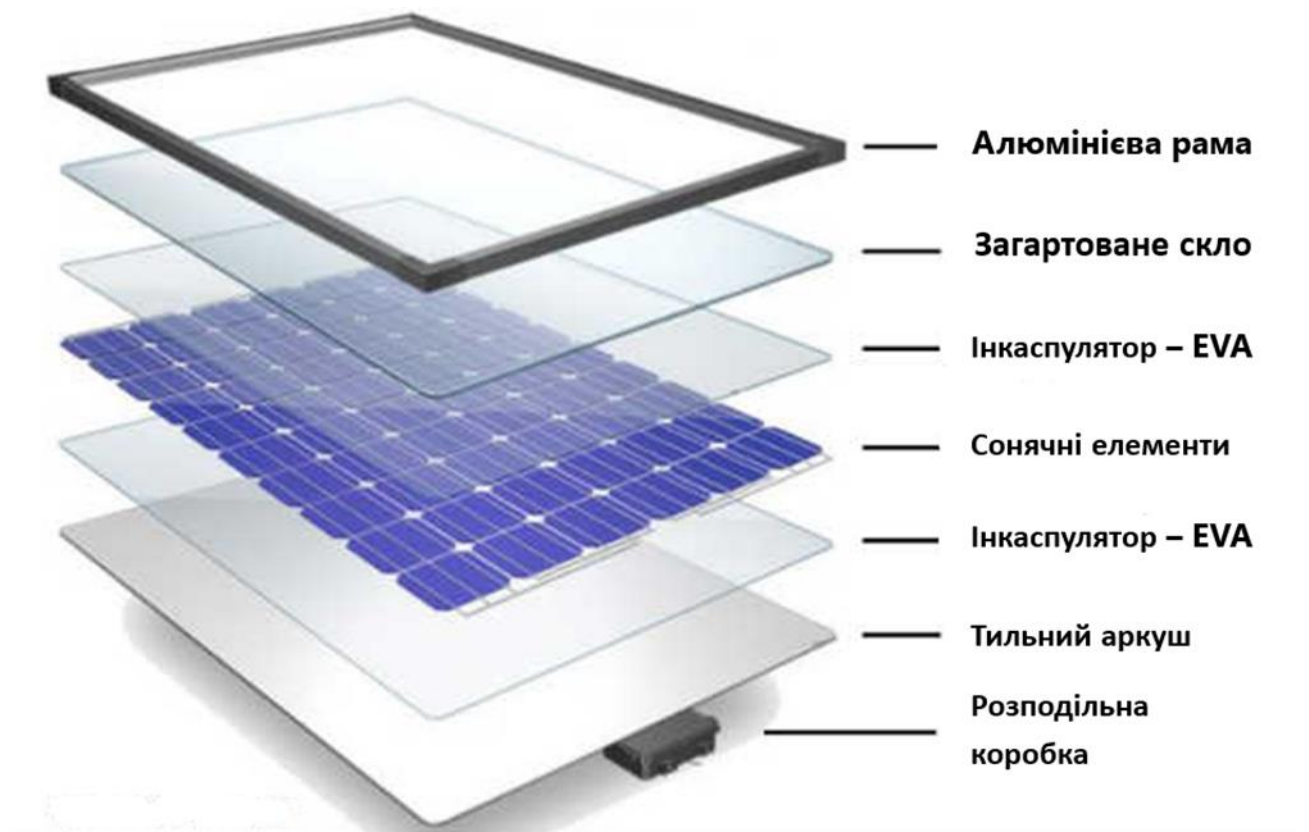


Рисунок 1.1. Структура сонячних панелей

Виробництво сонячних панелей вимагає використання сировини, в основному з якої є кварц, що переробляється в кремній. Крім того, алюміній, мідь та срібло є ключовими матеріалами, які досягаються або переробляються. Попит на ці ресурси значно зріс за останнє десятиліття через швидкий розвиток сонячної промисловості [16].

У цьому процесі кварц нагрівається у високотемпературних печах і вступає в реакцію з різними хімічними речовинами. Інші виробничі процеси включають формування екструдованого алюмінію в спіралі та прокатку загартованого скла.

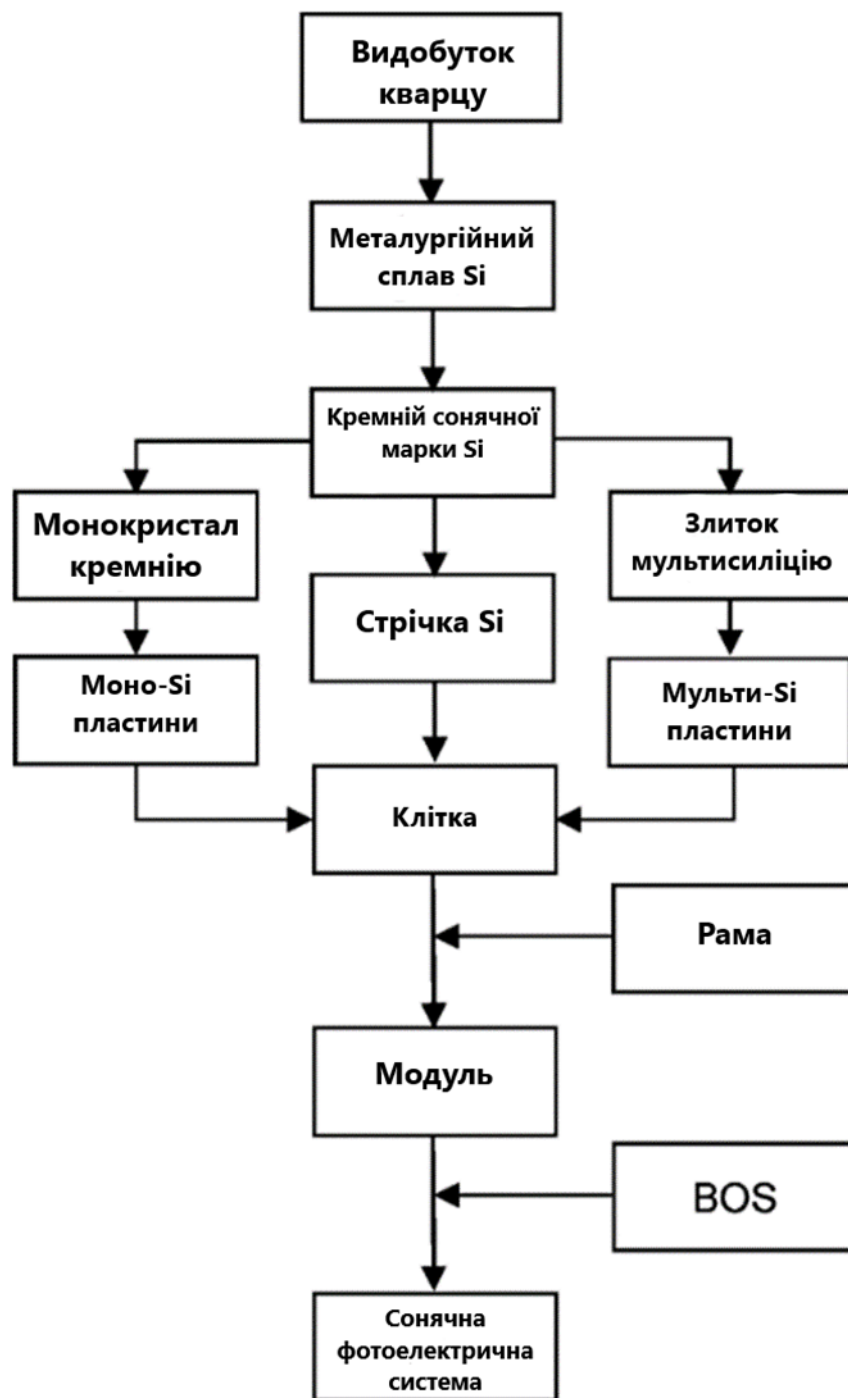


Рисунок 1.2. Схема виробничого процесу створення сонячної панелі [18].

Виробництво сонячних панелей використовує багато енергії, що призводить до високого початкового навантаження на загальний рівень викидів. Після встановлення сонячні панелі виробляють енергію без викидів протягом більш ніж 25 років.

Процес виробництва немає значення без контексту того, як вироблена енергія та інші джерела палива зберігаються протягом усього терміну служби(рис.1.2).

Вуглецева інтенсивність сонячних панелей та інших видів палива.
Інтенсивність викидів- це (загальна) кількість вуглецю, що викидається протягом терміну служби продукту, розрахована на одиницю енергії і виражена в грамах еквівалента вуглекислого газу на кіловат-годину (gCO_2/kWh) або в тоннах еквівалента вуглекислого газу на мегават-годину (tCO_2/MWh)[19].

Чим менша інтенсивність викидів, тим менший вплив на навколишнє середовище, оскільки для виробництва тієї ж кількості енергії викидається менше CO_2 .

Викиди вуглецю протягом життєвого циклу сонячної енергії.

Для того, щоб отримати чітке уявлення про вуглецевий слід сонячної енергетики, за останні десятиліття було проведено сотні досліджень з оцінки життєвого циклу, щоб оцінити профіль викидів сонячної енергії.

Ці оцінки включали початкову, експлуатаційну та після експлуатаційну фази виробництва енергії з різних джерел палива, включаючи сонячні фотоелектричні, сонячні теплові, вітрові, ядерні, природний газ та вугілля.

У 2014 році Національна лабораторія відновлюваної енергії Міністерства енергетики США (NREL) перевірила 400 таких досліджень, враховуючи розбіжності, викиди та інші фактори, що впливають на дані. Потім дані були узгоджені з використанням окремого набору припущень для порівняння(рис.1.3).

Результати показали, що сонячні батареї потребують приблизно від 60% до 70% енергії на початку, приблизно 25% під час роботи та приблизно від 5% до 20% після закінчення терміну служби.

З іншого боку, вугілля генерує ~98% своїх викидів під час процесу експлуатації (видобуток, транспортування, спалювання тощо) і лише 1% під час інших процесів [6, 19].

Ефективність сонячних панелей зараз майже на 50% вища, ніж тоді, коли проводилося це дослідження. Методи виробництва енергії на основі викопного палива спричиняють більше викидів CO₂ на кВт/год, ніж відновлювані джерела енергії.

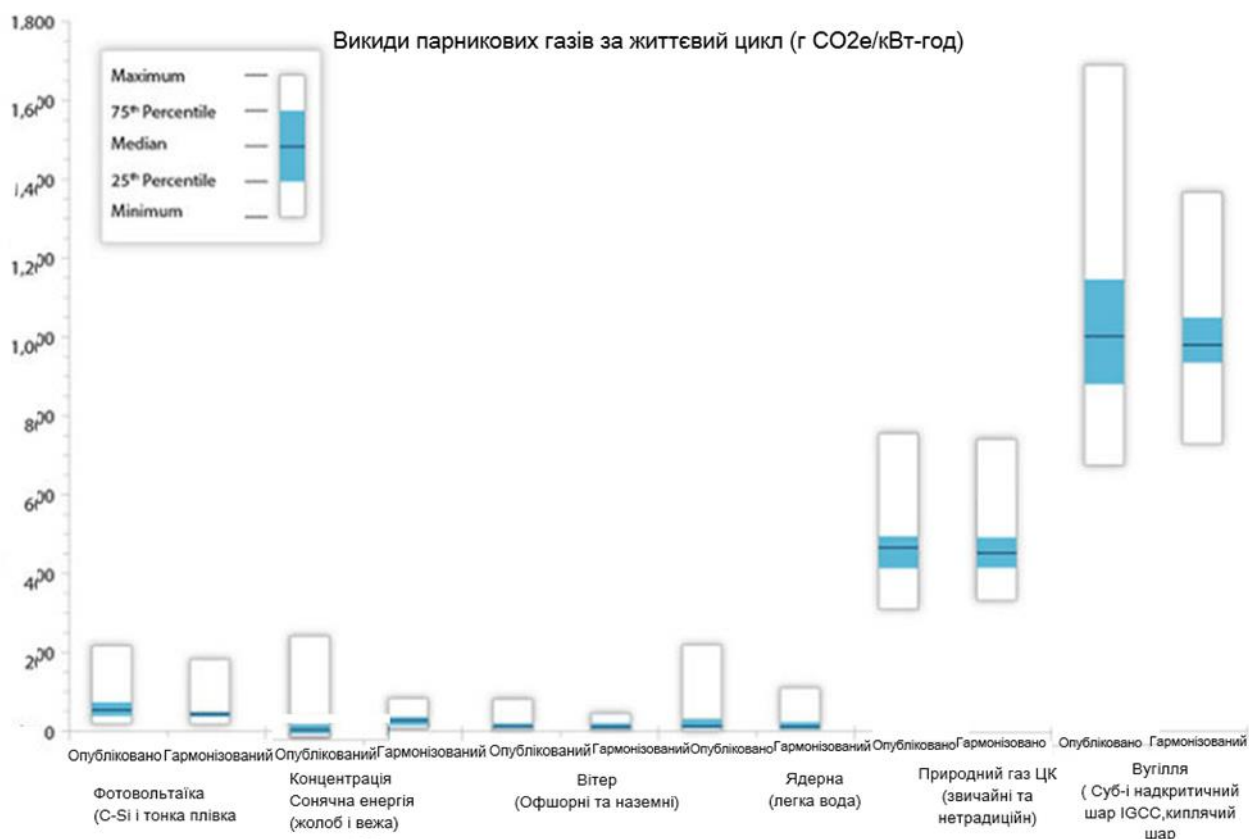


Рисунок 1.3. Викиди CO₂ протягом життєвого циклу.

Інтенсивність викидів сонячної фотоелектричної системи протягом життєвого циклу становить приблизно 40 гCO₂/кВт-год. Інтенсивність викидів вугілля протягом життєвого циклу становить приблизно 1000 гCO₂/кВт-год. Під час виготовлення вугілля викидається у 25 разів більше вуглекислого газу порівняно із сонячною енергією, для такої ж кількості електричної енергії [19].

Дисперсія інтенсивності випромінювання.

Виробництво більшої кількості кВт-год чистої енергії з того ж дефіциту виробництва призведе до подальшого зниження інтенсивності випромінювання фотоелектричних систем.

Навіть найгірші оцінки для сонячних фотоелектричних систем втричі кращі, ніж найкращі оцінки для вугілля (малоймовірно, що обидві ситуації є однаковими). Медіанні та середні значення дають більш точне уявлення про

інтенсивність викидів різних типів палива. Інтенсивність викидів є важливим показником, який слід враховувати при оцінці впливу сонячної енергії на навколишнє середовище.

Існують також подібні дослідження та мета-аналізи, які доводять вплив сонячних панелей на навколишнє середовище в порівнянні з іншими видами отримання енергії, визначеними NREL.

Період окупності сонячних панелей.

Якщо енергія, необхідна для виробництва сонячних панелей, перевищує енергію, яку вони вироблятимуть протягом свого життя, або, навпаки, якщо наслідки виробництва сонячних панелей гірші, ніж експлуатаційні вигоди, технологія є фундаментально недосконалою.

Щоб оцінити цінність фінансових інвестицій, люди часто дивляться на рентабельність інвестицій (ROI) або період окупності.

Енергетичний період окупності. Це час, необхідний для виробництва енергії, витраченої на виготовлення, транспортування та встановлення сонячних панелей. Термін окупності кремнієвих (монокристалічні та полікристалічні) становить 1,5-3 роки. Для тонкоплівкових панелей 1-2 роки. Фактори, що впливають на енергетичний період окупності географічне розташування, ККД та технологія виробництва.

Фінансовий період окупності. Це період, протягом якого інвестиції в сонячну електростанцію повертаються за рахунок економії на рахунках за електроенергію та продажу виробленої енергії. В Україні, для домашніх систем, цей період триває 5-8 років, з урахуванням «зеленого тарифу». Вартість обладнання та інсталяція тарифи на електроенергію та кількість сонячних днів на рік впливають на фінансовий період окупності.

Екологічний період окупності. Кількість часу, необхідного сонячному елементу для компенсації несприятливого впливу на навколишнє середовище, спричиненого процесом його виробництва. Екологічний період окупності для CO₂-викидів становить 1–4 роки. Викиди від виробництва компенсуються заміщенням електроенергії з викопних ресурсів [19, 20].

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Статистичні дані кількості сонячних електростанцій в Україні та Закарпатті за останні роки

Згідно даних реєстру НКРЕКП, 24 квітня 2024 року в Україні зареєстровано 1369 сонячних електростанцій, яким належить 931 ліцензія [21]. Сонячні електростанції є найпопулярнішим видом виробництва електроенергії, порівняно з вітровими, гідро- та біоелектростанціями.

Виробники електроенергії активно використовують схему державної підтримки у вигляді «зелених» тарифів. 97% електростанцій користуються перевагами цієї схеми.

Кількість сонячних електростанцій за областями України
станом на 24 квітня 2024 року

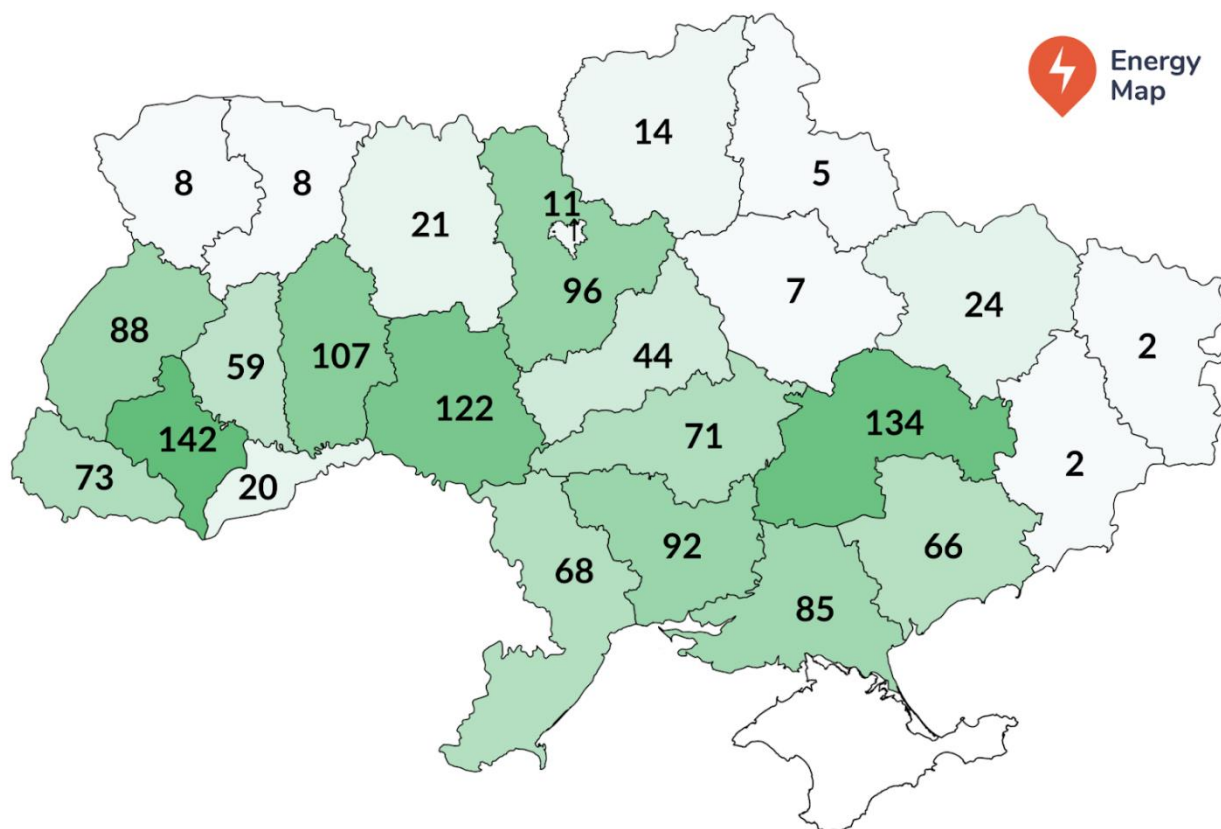
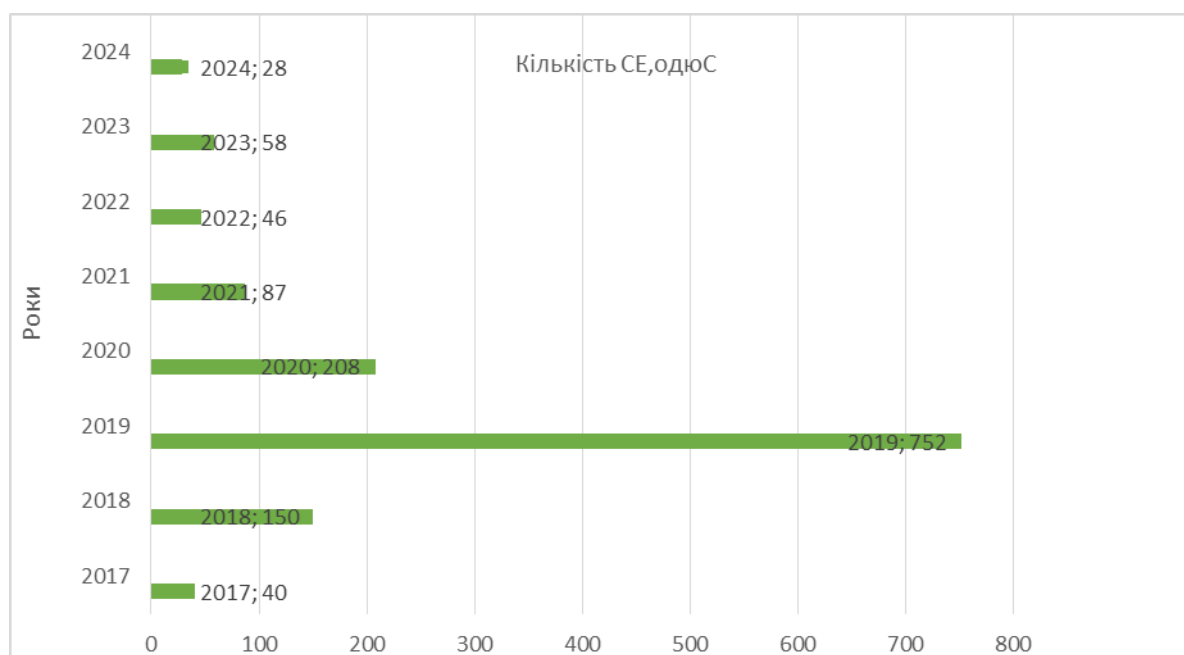


Рисунок 2.1. Кількість сонячних електростанцій за областями України [21].

Майже половина українських СЕС зосереджені в шести частинах. За даним реєстром, найбільша кількість сонячних електростанцій розміщена в Івано-Франківській (142), Дніпропетровській (134), Вінницькій (122),

Хмельницькій та Київській (по 107 станціях відповідно) та Миколаївській області (92). Найбільша кількість СЕС зафіксована в Луганській та Донецькій областях (по 2 станції), а також у Сумській (5) і Полтавській (7) областях (рис.2.1.).

Частина СЕС розташована на тимчасово окупованих територіях Херсонської, Запорізької, Донецької та Луганської областей. Такі електростанції поки не працюють в рамках української ОЕС [21].



Діаграма 2.2. Кількість сонячних електростанцій за останні роки.

Динаміка введення в експлуатацію нових сонячних об'єктів факторів, що 2019 рік став піковим за останні дев'ять років. Саме тоді спостерігалось найбільше зростання кількості сонячних фотоелектричних установок, після чого кількість виданих ліцензій на СЕС почала знижуватися(рис.2.2.).

В Україні за перші чотири місяці 2018 року обсяг виробництва сонячної електроенергії зріс на 52%, досягнувши 245 млн кВт. У другому кварталі 2018 року ще 1107 домогосподарств встановили сонячні панелі, що вдвічі більше з першим кварталом. Станом на кінець першого півріччя 2018 року загальна кількість таких домогосподарств досягла 4660, а потужність — майже 90 МВт. Київська, Дніпропетровська та Тернопільська області лідирують за кількістю приватних СЕС [22].

У жовтні 2018 року на Львівщині відкрили першу чергу СЕС «Яворів-1» потужністю 72 МВт, що дозволяє виробляти близько 80 млн кВт·год електроенергії на рік. У листопаді в смт Суворове Одеської області завершено монтаж сонячної станції потужністю 11,8 МВт. Вона складається з понад 36 тисяч модулів і є продовженням проекту «Суворове І».

У лютому 2019 року компанія «ДТЕК» розпочала підготовку до будівництва Покровської сонячної електростанції потужністю 240 МВт. У Хмельницькій області, на території села Панівці, введено в експлуатацію Кам'янець-Подільську СЕС потужністю 63 МВт, яка стала другою за потужністю в Україні.

У квітні 2019 року компанія «ГІУ Канада» завершила будівництво сонячної електростанції потужністю 13 575 МВт поблизу села Калинівка Миколаївської області. Генеральним підрядником проекту виступила компанія Helios Strategia. У цьому ж місяці розпочалося будівництво першої сонячної електростанції на Сумщині потужністю 5,7 МВт на території Тростянецької ОТГ [22].

У червні 2019 року на дахах виробничих будівель паркетної фабрики «Тандем Імпекс» було введено в експлуатацію одну з найбільших дахових СЕС в Україні. Станція потужністю 557,82 кВт забезпечує електроенергію цілого селища. Це друга промислова дахова СЕС у Харківській області, після «Фрунзе Солар» потужністю 106 кВт. Ця СЕС стала третьою за потужністю серед дахових станцій в Україні, керуючи лише СЕС «Долинське» у Херсонській області та «Синтез Солар» у Львівській області.

У 2020 році встановлена потужність вітрових та сонячних електростанцій зросла на 41%, а їхня частка у виробництві електроенергії збільшилася. Станом на жовтень 2020 року кількість домогосподарств, які перейшли на «чисту» енергію, досягла 27 623, а загальна потужність приватних сонячних електростанцій сягнула 712 МВт.

У 2021 році близько 15 тисяч українських родин встановили сонячні електростанції (СЕС), що майже вдвічі перевищує показник 2020 року.

Станом на кінець 2021 року в Україні нараховувалося близько 45 тисяч домогосподарств, що встановили сонячні панелі. Сукупна потужність таких СЕС перевищила 1,2 ГВт. До трійки лідерів за недостатньо встановлених СЕС вийшли такі області:

- Дніпропетровська – 6466 СЕС загальною потужністю 183 МВт,
- Закарпатська – 3744 СЕС загальна потужність якої становить 109 МВт;
- Тернопільська – 3447 СЕС загальною потужністю 98 МВт [23].

У 2021 році українцями було встановлено рекордні 15 тисяч сонячних електростанцій для дому, що стало найвищим показником за весь період дії «зеленого» тарифу. Станом на кінець року в країні нараховувалося близько 45 тисяч домогосподарств із сонячними панелями, які допомагають знизити витрати на електроенергію. Загальна потужність цих СЕС перевищила 1,2 ГВт.

Лідерами серед регіонів за недостатністю встановлених домашніх СЕС стали Дніпропетровська область із 6466 станціями потужністю 183 МВт, Закарпатська область із 3744 станціями потужністю 109 МВт та Тернопільська область із 3447 станціями потужністю 98 МВт. За підрахунками Держенергоефективності СЕС загальною потужністю 1205 МВт може щорічно виробляти близько 1400 млн кВт·год електроенергії (рис.2.3.) [24].

СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У ПРИВАТНИХ ДОМОГОСПОДАРСТВАХ



Рисунок 2.3. Динаміка встановлення сонячних електростанцій у приватних домогосподарствах [24].

З 24 лютого 2022 року енергетичні об'єкти України перебувають під постійними ракетними та безпілотними обстрілами і витримали сотні російських ударів. Щонайменше 13% промислових сонячних електростанцій були зруйновані або пошкоджені.

За оцінками АСЕУ, наразі на окупованих територіях функціонує 62 промислові СЕС загальною встановленою потужністю понад 950 МВт. Сюди не входить значна кількість менших побутових СЕС (з максимальною потужністю 30 кВт).

Наразі на території України функціонує близько 5900 МВт промислових СЕС та понад 1200 МВт малих домашніх СЕС, які також зазнали значних втрат в результаті бойових дій.

Станом на 1 березня 2024 року на території області у приватних домоволодіннях встановлено 4836 сонячних електрогенеруючих установ. Загальна потужність цих установ становить 138 МВт.

У літні місяці, під час пікових навантажень Закарпаття на рівні близько 330 МВт, сонячна генерація приватних домогосподарств забезпечує до 31% від загального енергоспоживання регіону. Водночас на території Закарпатської області функціонують підприємства, на яких експлуатуються 65 генеруючих установок з виробництва електричної енергії з сонячного випромінювання сумарною потужністю 244 МВт [22, 23].

2.2. Вплив сонячних панелей на об'єкти навколишнього середовища

Існує три типи сонячних панелей- монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові - які виробляються різними способами і, відповідно, мають різні викиди вуглецю(рис.2.4.).



Рисунок 2.4. Типи сонячних панелей.

Виробництво монокристалічних панелей

Монокристалічні панелі є найпоширенішими і мають найвищу ефективність перетворення енергії, зазвичай 19-22%. Монокристалічні сонячні панелі виготовляються з чистих однокомпонентних кристалів кремнію, затиснутих між тонким склом.

Щоб зробити монокристалічну сонячну панель, величезний блок кремнію формується, розрізається на невеликі пластини і прикріплюється до сонячної панелі. Це складний процес, і тому він спричиняє більше викидів, ніж будь-який інший метод виробництва сонячних панелей.

Виробництво полікристалічних панелей.

Полікристалічні сонячні панелі також виготовляються з кремнію, але замість блоків кристали кремнію розплавляються і розміщуються на панелі. Через процес плавлення виробництво полікристалічних сонячних панелей вимагає певної кількості електроенергії, хоча і не так багато, як монокристалічних панелей.

Виробництво тонкоплівкових панелей.

Вони виготовляються з різних типів матеріалів, включаючи аморфний кремній, телурид кадмію і селенід міді, індію та галію.

Загалом, тонкоплівкові сонячні панелі мають менший вуглецевий слід, ніж звичайні сонячні панелі, але мають той недолік, що виготовляються з надзвичайно токсичних матеріалів, які можуть бути шкідливими для людей і навколишнього середовища, якщо з ними не поводитися належним чином.

Більш масштабна проблема: переробка сонячних панелей

Асоціація промисловості сонячної енергетики (SEIA) встановила ціль, щоб до 2030 року сонячна енергія становила 30% виробництва енергії в США. Якщо цю мету буде досягнуто, понад 1 мільярд сонячних панелей активно збиратимуть сонячну енергію по всій території США. лише протягом наступного десятиліття [25].

З точки зору скорочення викидів вуглецю це добре, але вона також піднімає важливе питання переробки. Вчені працюють над кращими рішеннями, але не існує перевіреної системи утилізації старих сонячних панелей.

Сонячні панелі складаються з великої кількості дорогоцінних металів, і якби ці матеріали можна було переробляти і використовувати в інших цілях, а не видобувати, вуглецевий слід виробництва сонячних панелей можна було б зменшити. І навпаки, відсутність можливостей переробки сонячних панелей може збільшити кількість електронних відходів і, зрештою, призвести до дефіциту матеріалів для сонячних панелей.

2.3. Динаміка цін на сонячні панелі за останні 10 років

Протягом цього періоду ціна на сонячні панелі поступово знижувалася. Наприклад, середня вартість у 2015 році становила приблизно 0,69 долара США з ПДВ, але до 2019 року вона впала до 0,37 долара США з ПДВ, тобто на 46%.

У період з 2014 року до кінця 2017 року обсяг потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зріс з 967 МВт до 1375 МВт, а до кінця першого кварталу 2018 року досяг 1534 МВт (рис. 2.5). Детальний розподіл ВДЕ за регіонами та домінуючі види відновлюваної енергії в різних областях представлено на рис.2.6. [25].

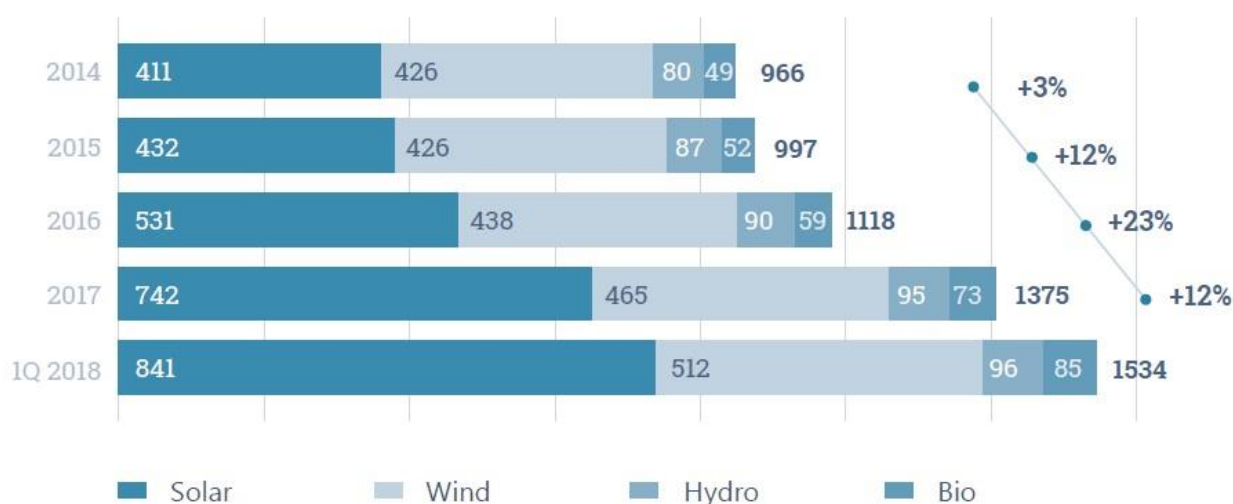


Рис. 2.5., Зростання ВДЕ за 2014 – I квартал 2018 рр. Джерело: Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential, National Investment Council of Ukraine, 2018.

Оскільки в Україні сонячна енергія – доволі популярне ВДЕ, можна спостерігати, що регіональний розподіл встановлених об'єктів ВДЕ корелює з рівнем інсоляції[26]. Основна увага приділяється регіонам із найвищою сонячною активністю, як показано на рис. 2.7.

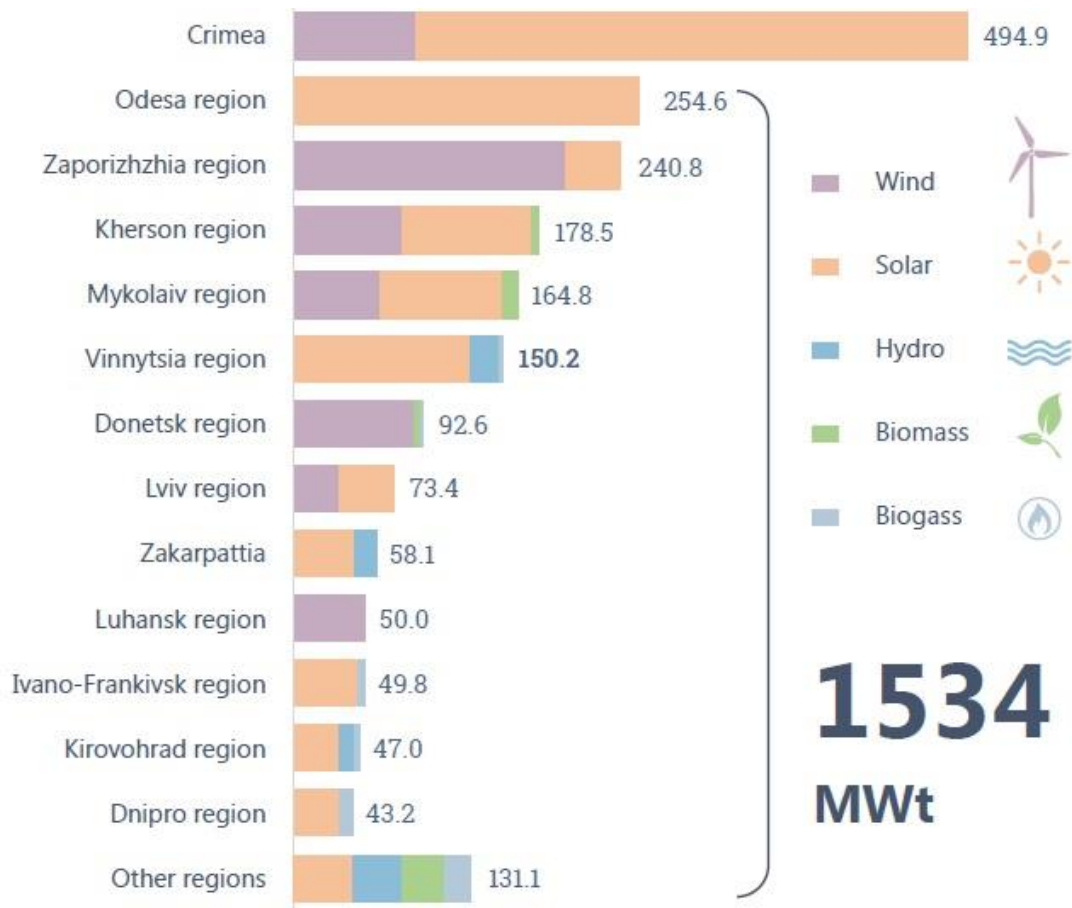


Рис. 2.6. Виробництво ВДЕ по регіонах станом на I квартал 2018 року.
 Джерело: Renewable energy sector: Unlocking sustainable energy potential,
 National Investment Council of Ukraine, 2018[26].

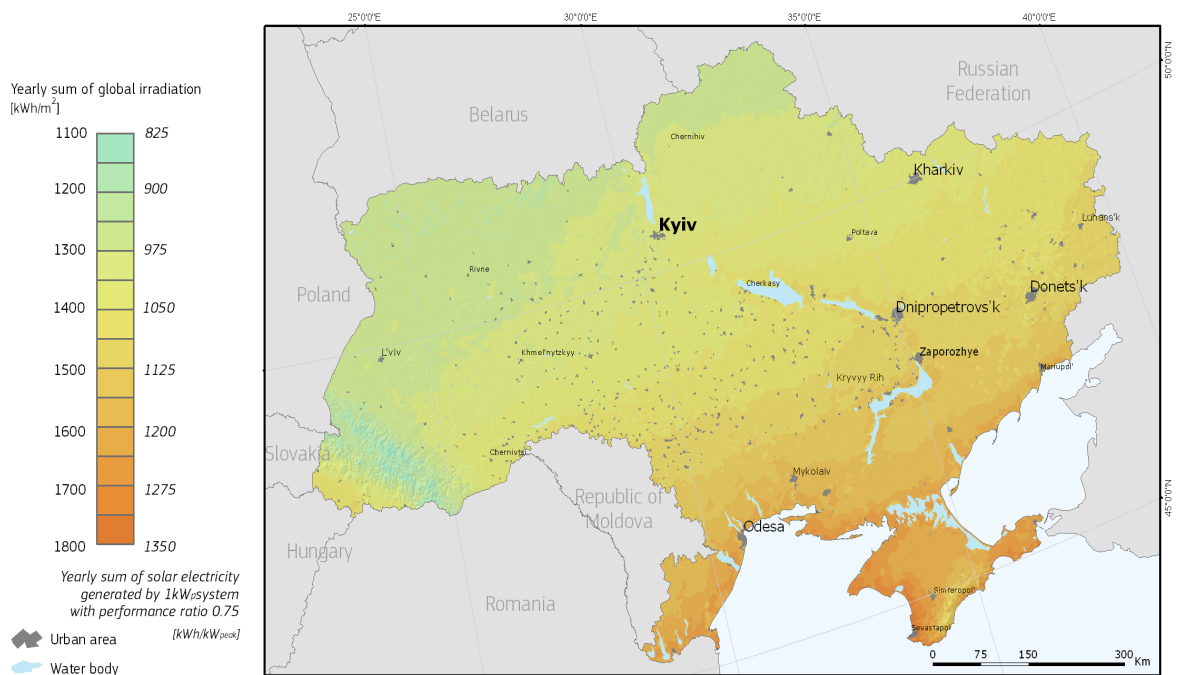
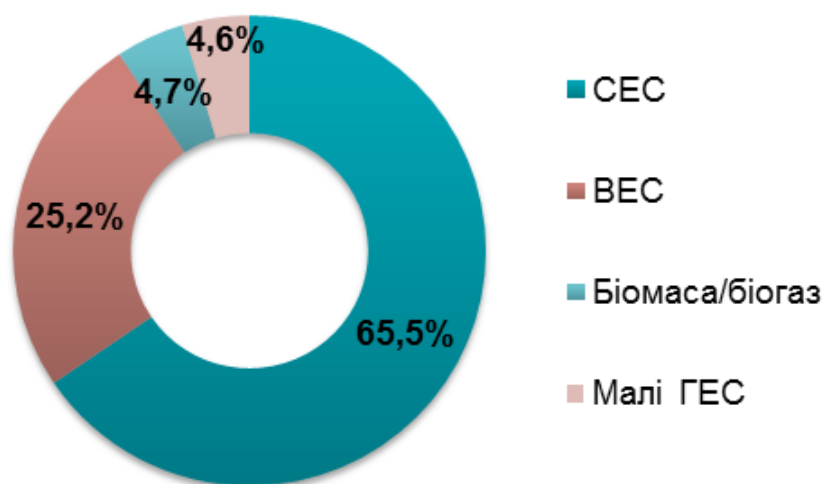


Рисунок 2.7. Потенціал сонячної енергії по регіонам України.

У 2018 році обсяг виробництва електроенергії за «зеленим тарифом» (з відновлених джерел енергії — ВДЕ) досягає 2777,3 млн кВт-год. протягом 2013-2018 років український ринок сонячної енергії виріс із невеликого сегмента, що складався з кількох пілотних проектів, до одного з найбільших і найдинамічніших (рис. 2.8.). У 2018 році завершено численні проекти будівництва сонячних електростанцій (СЕС) за участю як вітчизняних, так і іноземних компаній. Серед них — «Енергопарк Яворів», «Нива Солар», «Токмак Солар Енерджі» [26].

Структура виробників електроенергії з ВДЕ за «зеленим тарифом» в 2018 р в Україні, за кількістю встановленої потужності



Джерело: за даними НКРЕКП

Рисунок 2.8. Структура виробників електроенергії з ВДЕ за зеленим тарифом в 2018 р.

Згідно з даними Держенергоефективності, станом на 2019 рік в Україні 8850 сімей встановили домашні сонячні електростанції (СЕС) потужністю до 30 кВт. Лише за перший квартал 2019 року було додано близько 1400 нових домашніх СЕС [27].

Пандемія COVID-19 вплинула на ринок сонячної енергетики, спричинивши тимчасове зростання цін через перебої з постачанням та логістикою. Однак, незважаючи на ці труднощі, ринок продовжував зростати.

Воєнні дії в Україні та енергетична криза призвели до сплеску попиту на альтернативну енергію. У 2021 році середня ціна панелей на платформі OLX становила 1990 грн, а у 2022 році зросла до 6000 грн.

У 2020 році сонячний сектор України збільшився на 1169 МВт комерційної фотоелектричної потужності та на 226 МВт у приватному секторі. Сумарно, станом на 1 січня 2021 року загальна встановлена потужність сонячної енергії в Україні досягла 6873 МВт. З них 779 МВт, або 11%, припадає на приватні домашні фотостанції потужністю до 30 кВт (рис. 2.9.) [27].

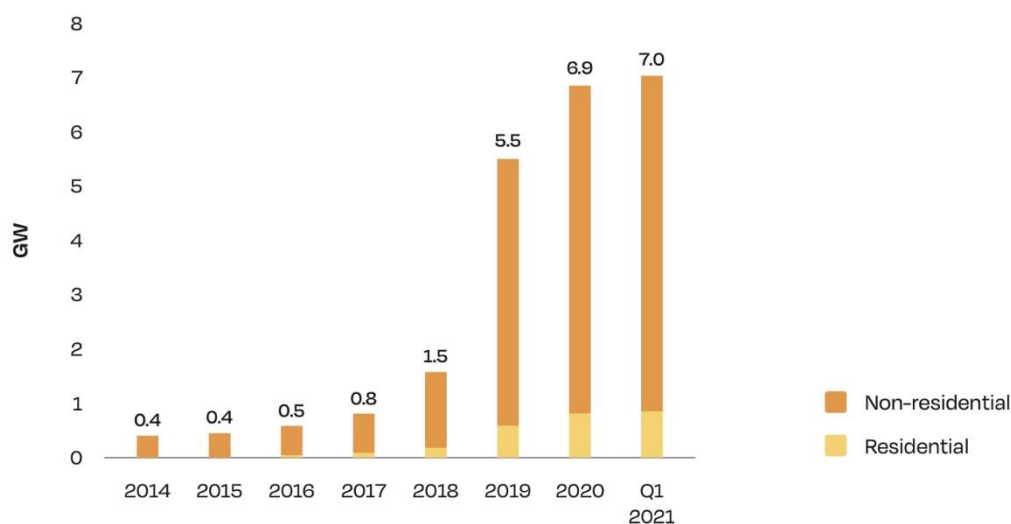


Рисунок 2.9. Встановлена потужність комерційних та приватних сонячних електростанцій в Україні (Solar Power Europe, ACEU)

Орієнтовні ціни на сонячні панелі різних виробників у 2020 році:

Altek: Потужність: моделі, такі як ALT-100 і ALT-120, мають номінальну потужність 100 Вт і 120 Вт відповідно. Вони підходять для портативного використання або невеликих систем живлення. Ціна: панелі цієї марки доступні за ціною від 2400 до 3800 грн залежно від моделі та специфікацій

JA Solar: Потужність: переважно від 300 Вт до 550 Вт. Панелі призначені для встановлення в комерційних та житлових об'єктах. Ціна: залежно від потужності, ціна може коливатися від 2800 до 5400 грн.

LG: Потужність: доступні моделі від 350 Вт до 400+ Вт, відомі своєю високою ефективністю та тривалим терміном служби. Ціна: панелі преміум-сегмента, вартість від 7600 до 13800 грн, що пояснюється інноваційними технологіями та тривалим терміном гарантії

Panasonic: Потужність: панелі цієї марки, як правило, мають потужність від 325 Вт до 400 Вт. Вони підходять для сонячних систем із високими вимогами до ефективності. Ціна: від 9300 до 16300 грн, залежно від моделі та технічних характеристик

LONGi Solar: Потужність: переважно 360–460 Вт. Відзначаються доступною ціною та високою продуктивністю для свого класу. Ціна: варіюється від 4300 до 5600 грн.[28].

2023-2024: ринок починає стабілізуватися і ціна на сонячні панелі дещо падає; станом на 2024 рік середня ціна сонячних панелей на OLX становить 3000 грн. На даний момент ціна панелі виробника Longi Solar потужністю 585 Ватт (LR5-72НТН-585М) складає 5280 грн (рис.2.10.) [29].

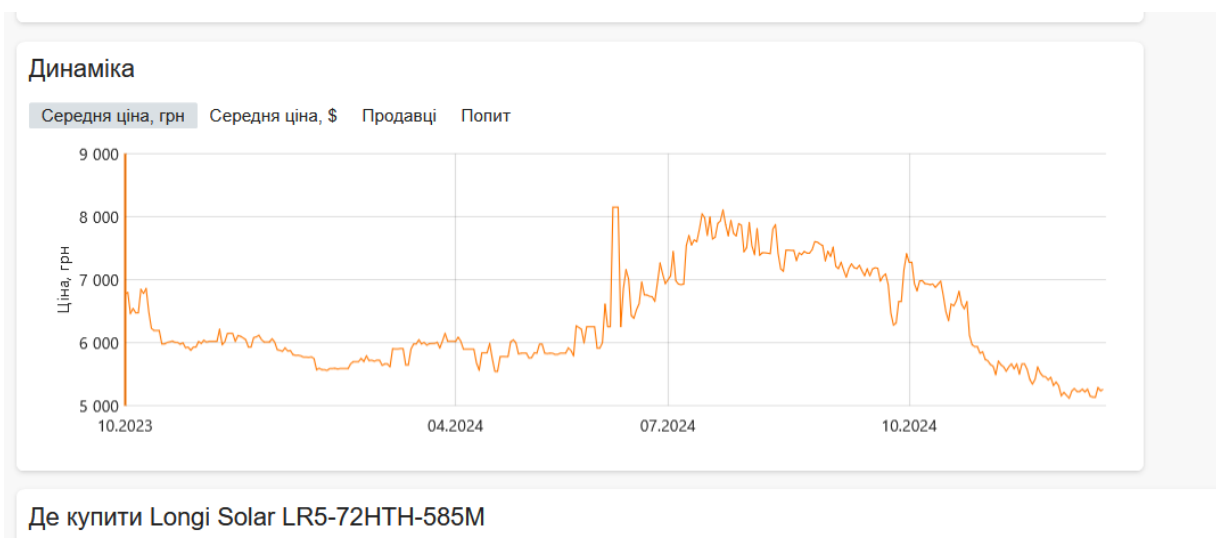


Рисунок 2.10. Динаміка вартості панелі LR5-72НТН-585М у 2024 році
(Джерело: hotline.ua)

Порівняно з довоєнним роком 2021 року кількість оголошень про продаж сонячних панелей на платформі OLX зросла в 410 разів: з 9 пропозицій до 3690 у 2024 році. Попит також зріс більш ніж у 700 разів: з 38 пропозицій у 2021 році до 29000 у 2024 році.

Відбулися цікаві зміни в цінах на сонячні панелі: медіанна ціна в 2021 році становила 1990 грн, яка потроїлася до 6000 грн у 2022 році. Через рік, у 2023 році, платформа зафіксувала медіанну ціну на сонячні панелі в 2899 грн, яка зараз становить 3000 грн. Графік зміни цін за останні роки зображений на рисунку(2.11.) [28].



Рисунок 2.11. Вартість сонячних панелей з 2021-2024 року.

Потреба на інвертори для сонячних електростанцій продемонстрував стабільне зростання. Якщо у 2021 році кількість відгуків на оголошення становила 22 тисячі, то до 2024 року вона зросла до 823 тисяч, що означає зростання на 3516%. Кількість оголошень на платформі також зросла з 1000 у 2021 році до 77 тисяч у 2024. При цьому середня ціна на інвертори дещо зменшилася відносно ціни на сонячні панелі.

Динаміка попиту на акумулятори для сонячних станцій варіювалася залежно від їх типу. Літій-іонні акумулятори продемонстрували значне зростання попиту: кількість відгуків зросла з 6 у 2021 році до понад 100 тисяч у 2024 році. Кількість оголошень збільшилася з 3 до 14 тисяч. Середня ціна на літій-іонні акумулятори коливалася: у 2021 році вона становила 5 640 грн, станом на 2022 році зросла до 24 999 грн, у 2024 році зменшилася до 15 тисяч гривень.

Літій-полімерні акумулятори також демонструють аналогічну тенденцію зростання. Якщо у 2021 році не було жодного відгуку, то у 2024 році їх кількість сягнула 901. Число оголошень за цей період зросло з 3 до 1357. Середня вартість

піднялася з 3000 грн у 2021 році до 17 500 грн у 2024 році, а найвищу ціну було зафіксовано у 2022 році — 20 000 грн..

Особливу увагу привертають літій-залізо-фосфатні акумулятори, попит на які різко зріс: з 316 відгуків у 2021 році до майже 300 тисяч у 2024 році. Водночас медіанна вартість цих акумуляторів зменшилася на 12% порівняно з 2021 роком і наразі склала 25 551 грн. Поширені конфігурації включають 12В/100Аг, 24В/200Аг та 48В/300Аг [28].

Даний тип акумуляторів має ряд переваг, серед яких: можливість зарядки високими струмами, велика кількість уклів заряд-розряд, а отже і генерування меншої кількості відходів, тощо [30].

Літій-залізо-фосфатні акумулятори - це тип літій-іонних акумуляторів, в яких використовується LiFePO_4 як катодний матеріал, різної ємності з номінальною напругою 12В та 48В призначені для використання в якості джерела автономного (резервного) живлення і забезпечують надійне електропостачання технологічного обладнання відповідно до технічних характеристик.. Ці батареї відомі своєю безпекою, тривалим терміном служби та стабільною роботою. Вони набули популярності завдяки використанню в електромобілях, системах зберігання енергії та портативних пристроях [31].

Ціни на LiFePO_4 акумулятори за останні 10 років знижувалися завдяки масовому виробництву і технологічному удосконаленню. З 2013 по 2023 рік середня вартість знизилася приблизно з 500-600 дол./кВт·год до 120-180 дол./кВт· год. Вартість залежить від ємності та виробника. Наприклад, у 2023 році ціни на акумуляторну ємність 12В/100Аг варіюються в межах 300-500 дол. США [32].

Отже пропозиція по панелям, інверторам та акумуляторам постійно зростає. Враховуючи закон «попиту та пропозиції» [33] можна стверджувати про зростання зацікавленості населення та бізнесу у товарах та технологіях сонячної енергетики.

2.4. Правила техніки безпеки

1. Перед початком роботи всі учасники освітнього процесу повинні бути ознайомлені з правилами та протоколами техніки безпеки.
2. Працювати у добре провітрених приміщеннях.
3. Під час проведення дослідження або роботи в лабораторії потрібно носити відповідний захисний одяг (халати , захисні окуляри, рукавиці , маски тощо)
4. Здійснювати регулярні перевірки відповідного устаткування.
5. Не проводити експерименти або дослідження , які не відповідають меті або не мають належного дозволу .
6. Після сповіщення про початок повітряної тривоги потрібно негайно перейти в укриття та залишатися там відповідно до її закінчення.

2.5. Характеристика проведення дослідження

Під час написання дипломної роботи було організовано та проведено соціологічне онлайн опитування, головною заявкою якого було дослідження сприйняття населенням впливу технологічного прогресу на розвиток і використання сонячної енергетики. Опитування дозволило виявити громадську думку щодо обізнаності та ставлення населення до впровадження сонячних панелей.

Методика проведення опитування

Для збору первинної інформації використовувалося онлайн-анкетування, створене за допомогою платформи Google Forms. Посилання на анкету було розширено через соціальні мережі, тематичні форуми та електронну пошту, що забезпечило охоплення різних категорій населення. Завдяки інструментам Google Forms опитування було проведено анонімно, що дозволило респондентам висловлювати свою думку вільно та без упереджень.

Опитування складалося з кількох ключових етапів:

Підготовчо-організаційний етап.

Проведено аналіз наявної літератури та дослідження з питань технологічного прогресу та розвитку сонячної енергетики. Розроблено план дослідження, що включає визначення основних питань і гіпотез. Створено анкету, яка містила чітко сформульовані запитання для респондентів, а також розроблено інструкції для правильного заповнення форми. Підібрано програмне забезпечення для обробки даних, зокрема для аналізу статистичної інформації.

Етап збору даних.

Опитування охопило 7 ключових питань, серед яких були демографічні питання (вік та соціальний статус) та тематичні питання, пов'язані з розвитком сонячної енергетики.

Обробка та аналіз отриманих даних.

Проведено попередню підготовку даних, включаючи фільтр відповідей та узагальнення. Виконано математичну обробку результатів за допомогою статистичних методів.

На основі отриманих результатів сформульовано висновки та рекомендації щодо подальшого розвитку технологій для стимулювання використання сонячної енергії.

Основні аспекти анкети

Анкета містила як закриті, так і відкриті запитання, які дозволили отримати як кількісні, так і якісні дані. Основні питання стосуються: Обізнаності респондентів із принципом роботи та використанням сонячних панелей. Ставлення та планів щодо встановлення сонячних панелей. Також, ставлення до їх використання з точки зору екологічної безпеки.

Проведене опитування дало змогу зібрати цінну інформацію, яка стала основою для аналітичної частини роботи та внести пропозиції щодо популяризації використання сонячної енергії [34].

РОЗДІЛ 3 ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Результати опитування

Технічний прогрес є рушійною силою розвитку сонячної енергетики, яка стає доступнішою та ефективнішою. Розглядаючи взаємозв'язок технічного прогресу із поширенням сонячних панелей, важливо впливати на ставлення суспільства, рівень обізнаності населення, а також мотивацію для їх впровадження. Анкетування дозволяє реалізувати суспільні настрої, що формуються під впливом інновацій.

Результати анкетування охоплюють респондентів віком від 18 до 65 років, причому найбільший відсоток становлять люди з постійною роботою (рис. 3.1.). Це вказує на те, що стабільний дохід, сприяє їх зацікавленості в довгострокових інвестиціях, таких як встановленні сонячні панелі.

Молодші респонденти (18–35 років) демонструють більший інтерес до сучасних екотехнологій і готовність бачити більше про свої переваги. Старші респонденти (45–65 років), хоча й менш знайомі з технологіями мають позитивне ставлення до використання сонячної енергії.



Рис.3.1. Статус зайнятості респондентів.

Технічний прогрес значно розширює доступ до інформації про сонячну енергетику, проте майже 64,9% опитаних мають лише поверхнєве розуміння або

зовсім не знайомі з їх принципами роботи (рис.3.2.). Це говорить про недостатню кількість просвітницьких ініціатив, щодо інформування населення про переваги ВДЕ вціолму та сонячної енергетики зокрема. З удосконаленням технологій та зростанням кількості прикладів використання панелей рівень обізнаності може зрости.



Рис.3.2. Рівень обізнаності про сонячні панелі.

Ставлення до сонячних панелей серед опитаних: позитивно ставлюсь (67%), нейтрально (14%), негативно (3%), готовий(-а) знати більше (16%). Не зацікавлений(-а) (0%).

67% позитивного ставлення показує на високий потенціал для розширення впровадження сонячних панелей (рис.3.3.). Технічний прогрес робить сонячні панелі дешевшими та ефективнішими, що зміцнює позитивне сприйняття. Той факт, що 16% респондентів бажають знати більше, говорить про наявність комунікаційних проблем, які пояснювали б переваги та механізми роботи сонячних панелей.



Рис.3.3. Ставлення до використання сонячних панелей.

Плани встановлення панелей у 23 респондентів показали, що ініціативи зі здешевлення технологій можуть стимулювати ширше впровадження (рис 3.4.). Зараз головними бар'єрами залишаються фінансові можливості, як отримання у відповідях: "Не планую встановити, бо не маю такої фінансової можливості".



Рис.3.4. Плани щодо встановлення сонячних панелей.

Мотиви установки сонячних панелей розкривають різноманітні погляди респондентів на доцільність цієї технології (рис.3.5.). Найбільший відсоток 18,33% відзначають економію витрат на електроенергію як ключову мотивацію. Це демонструє прагнення людей до фінансової вигоди, що є одним із головних стимулів для впровадження сонячних панелей, особливо в умовах зростання цін на традиційні енергоресурси.

Водночас лише 6,11% респондентів відзначають екологічну мотивацію, наприклад, збереження довкілля чи підтримку розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Це вказує про те, що хоча екологічна свідомість серед населення збільшується, вона поки що не є основним чинником для впровадження технологій. Технічний прогрес, зокрема інновації у сфері виробництва панелей з меншим екологічним слідом, може посилити цей аспект у майбутньому.



Рис.3.5. Причини встановлення сонячних панелей.

Якщо взяти до уваги відповіді тих респондентів в яких вже встановлені сонячні панелі та тих які планують найближчим часом їх встановити то найбільший відсоток для обох категорій припадає на причину «Зменшення витрат на електроенергію» (рис. 3.6. -3.7.). Це демонструє прагнення людей до фінансової вигоди, що є одним із головних стимулів для впровадження сонячних панелей, особливо в умовах зростання цін на традиційні енергоресурси.

Можливо у цю відповідь опитані включають також енергонезалежність, яка є дуже актуальною з початком війни.



Рис.3.6. Причини встановлення панелей (встановлені панелі)



Рис.3.7. Причини встановлення панелей (встановлені)

Екологічна безпека є важливим аспектом у сприйнятті сонячних панелей. 51% респондентів вважають, що їх використання позитивно впливає на екологічну безпеку. Водночас 10% не впевнені у впливі сонячних панелей на навколишнє середовище, а 3% вважають їхній вплив негативним. Це говорить про наявність певних стереотипів або недостатню обізнаність про технологію (рис.3.8.).

Значний відсоток (25%) респондентів готові знати більше про екологічний вплив сонячних панелей, що підкреслює важливість просвітницької роботи.

Освітні кампанії можуть акцентувати увагу на екологічних перевагах, таких як зменшення викидів вуглецю, мінімальний вплив на довкілля під час експлуатації та можливості переробки компонентів.

11% респондентів, які не знайомі з темою екологічної безпеки, потребують базової інформації про переваги та деякі виклики використання сонячної енергетики.

Технічний прогрес ключову роль у зниженні екологічного сліду сонячних панелей завдяки вдосконаленню технологій виробництва, використанню більш стійких матеріалів та підвищенню ефективності. Такі зміни можуть суттєво підвищити довіру до цієї технології та стимулювати її ширше впровадження.

Як ви ставитеся до їх використання з точки зору екологічної безпеки?

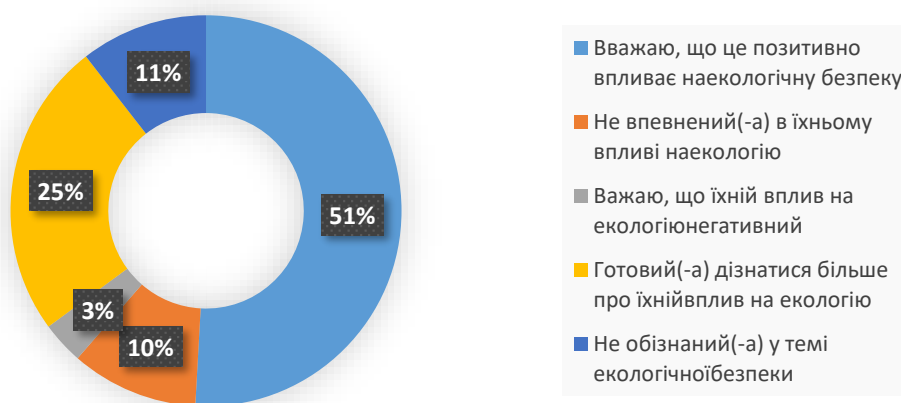


Рис.3.8. Екологічна безпека.

Опитування показує на брак обізнаності населення, щодо важливості впровадження ВДЕ для забезпечення сталого розвитку [35] та слабку просвітницьку діяльність органів влади.

Для покращення взаємодії органів влади та населення можна запропонувати видавати буклети (банери, постери), щодо переваг сонячних електростанцій (рис.3.9. та рис.3.10.), адже візуальна інформація легка для сприйняття.

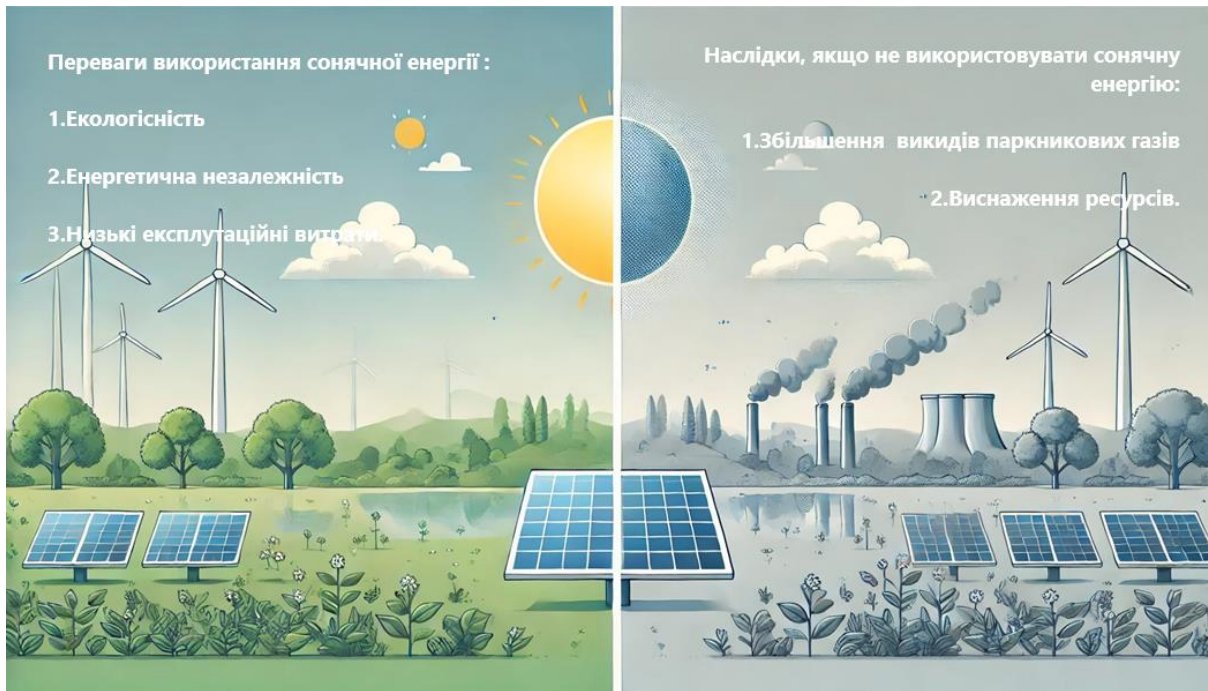


Рис.3.9. Переваги сонячних електростанцій.



Рис.3.10. Переваги дахових та наземних сонячних електростанцій.

Аналогічні матеріали можна створювати, щодо кредитування, субсидіювання встановлення сонячних електростанцій, термінів окупності, економічних вигод встановлення, тощо.

ВИСНОВКИ

1. Використання сонячної енергії перейшло від перших експериментальних сонячних батарей 1950-х років до сучасних високоефективних панелей, які можуть забезпечувати електроенергією цілі міста. Інновації в розробці і технології виробництва таких матеріалів, як кремній, значно знизили витрати і підвищили доступність сонячних панелей.
2. Сонячні електростанції позитивно впливають на навколишнє середовище, зменшуючи викиди парникових газів та залежність від викопного палива, однак потребують ефективного вирішення питань утилізації відпрацьованих панелей. Аналіз динаміки їх зростання показує стабільне зростання кількості станцій за рахунок державних стимулів, зниження вартості технологій та зростання екологічної свідомості. Подальше збільшення масштабів використання сонячної енергії потребує врахування екологічних ризиків та посилення інновацій у сфері переробки панелей.
3. Дослідження показало, що люди позитивно ставляться до сонячної енергетики, але фінансова доступність та обізнаність все ще залишаються важливими факторами для її впровадження. Досягнення в області технологій допоможуть знизити вартість панелей і підвищити ефективність задоволення потреб населення. Розширення інформаційної та освітньої діяльності може ще більше стимулювати інтерес до сонячної енергетики та її підтримку.

Рекомендації

На глобальному рівні :

1. Почати розробку ефективних технологій рециклінгу відпрацьованих сонячних панелей для зменшення екологічного навантаження.
2. Розробити міжнародні стандарти та протоколи для використання сонячних панелей, щоб забезпечити узгодженість дій між країнами.
3. Активізувати дослідження нових матеріалів для сонячних панелей, які є екологічно безпечними та легко утилізуються.

4. Почати пошук економічних рішень для створення глобальних фондів, які фінансують використання відпрацьованих панелей, зокрема для країн, що розвиваються.

На національному рівні :

1. Провести масштабну просвітницьку діяльність серед населення про переваги відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та важливість геліоенергетики для енергетичної незалежності та довкілля.
2. Впровадити державні програми субсидування домогосподарств та підприємств, які встановлюють сонячні електростанції, включаючи пільгові кредити та податкові знижки.
3. Розробити національні програми збору та утилізації відпрацьованих сонячних панелей, що включають інфраструктуру для їх переробки.
4. Забезпечити контроль за якістю встановлення панелей та їх відповідністю екологічним стандартам.

На регіональному рівні :

1. Розробити та впровадити механізми оцінки екологічного впливу перед встановленням промислових сонячних електростанцій, щоб уникнути проектів із наявними шкідливими наслідками для довкілля.
2. Запровадити регіональні ініціативи для підтримки «зелених» проектів, які включають співпрацю з місцевими громадами та бізнесом.
3. Організувати тренінги та консультації для населення і підприємців щодо переваг використання ВДЕ та способів їх впровадження.
4. Підтримувати створення регіональних фондів для фінансування малих і середніх проектів у галузі геліоенергетики.

Ці рекомендації спрямовані на підвищення ефективності використання сонячної енергії, забезпечення екологічної безпеки та стимулювання розвитку відновлюваних джерел енергії на всіх рівнях.

РЕЗЮМЕ

У даній роботі досліджено екологічні аспекти сонячної енергетики, зокрема її вплив на довкілля, переваги та виклики впровадження. Аналіз показав, що сонячна енергетика є одним із найперспективніших напрямків у сфері відновлюваних джерел енергії за низького рівня викидів парникових газів, можливості скорочення збереження від викопних палив та стійкості ресурсів. Водночас окреслено екологічні ризики, пов'язані з виробництвом, транспортуванням та утилізацією сонячних панелей, а також використанням рідкоземельних металів.

Основними факторами, які сприяють екологічності та ефективності сонячної енергетики, є впровадження інноваційних технологій, які зменшують енергозатрати під час виробництва, покращують рециклінг панелей та мінімізують використання токсичних матеріалів. Проте ключовими перешкодами залишаються знищені застарілі механізми утилізації відпрацьованих панелей, недостатня інфраструктура та низька обізнаність суспільства щодо екологічних переваг сонячної енергетики.

Беручи до уваги аналіз результатів, подальший розвиток сонячної енергетики потребує розробки екологічно орієнтованих стратегій, включаючи вдосконалення методів переробки відпрацьованих матеріалів, зниження енергозатрат на виробництво панелей, а також створення фінансових і нормативних стимулів для широкого впровадження сонячної енергії. Важливою є і підтримка освітніх програм, які сприяють підвищенню обізнаності суспільства про екологічні та економічні переваги цього джерела енергії.

SUMMARY

This paper examines the environmental aspects of solar energy, including its environmental impact, benefits, and implementation challenges. The analysis shows that solar energy is one of the most promising renewable energy options with low greenhouse gas emissions, potential for reducing fossil fuel dependence, and resource sustainability. At the same time, it outlines the environmental risks associated with the production, transportation, and disposal of solar panels, as well as the use of rare earth metals.

The main factors contributing to the sustainability and efficiency of solar energy are the introduction of innovative technologies that reduce energy consumption during production, improve panel recycling and minimize the use of toxic materials. However, key obstacles remain outdated mechanisms for disposing of used panels, insufficient infrastructure and low public awareness of the environmental benefits of solar energy.

Taking into account the analysis of the results, the further development of solar energy requires the development of environmentally friendly strategies, including improving methods for recycling waste materials, reducing energy costs for panel production, as well as creating financial and regulatory incentives for the widespread introduction of solar energy. It is also important to support educational programs that help raise public awareness of the environmental and economic benefits of this energy source.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергія сонця: веб-сайт. [URL:https://sae.gov.ua/uk/ae/sunenergy](https://sae.gov.ua/uk/ae/sunenergy) (дата звернення:15.10.2024).
2. V.G. Belessiotis; E. Papanicolaou; History of Solar Energy. *Comprehensive Renewable Energy*. 2012. P.85-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00303-6>.
3. Коротка історія сонячних батарей : веб-сайт. URL: <https://solarmuseum.org/history/> (дата звернення:16.10.2024).
4. The Silicon Solar Cell Turns 50. *National Center for Photovoltaics*: веб-сайт URL:<https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf> (дата звернення: 22.10.2024).
5. М.В. Шаповал, О.В. Орищенко, А.І. Криворот, В.В. Вірченко. Огляд сучасних досягнень в автомобільній індустрії. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту. *XVI Міжнар. наук.-практ. конф.*, матеріали 23-25 жовт.2023 р.
6. [Карпчук Г.Л.](#), Будько В.І. Аналіз технологій фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. *Відновлювана енергетика*. 2023. №2(73). С.32–38. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).32-38](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).32-38).
7. Xiaojuan F., Advanced progress in metal halide perovskite solar cells: A review. *Materials Today Sustainability*, 2023, Vol. 24, 100603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100603> .
8. П. П. Мирутенко, Л. К. Лістовщик. Накопичувачі енергії. Основні типи та перспективи застосування. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022, № 4, 10 с.
9. Alaa H. S., Omar A. A., Van H. I. Assessment of the Performance of Bifacial Solar Panels. *IJETR*. 2018. Vol.8, P. 2454-4698.
- 10.Реліз новин: двосторонні перовскітові сонячні батареї вказують на вищу ефективність. Національна лабораторія відновлюваної енергії: веб-сайт.

- [URL:https://www.nrel.gov/news/press/2023/news-release-bifacialperovskitesolar-cell-point-to-higher-efficiency.html](https://www.nrel.gov/news/press/2023/news-release-bifacialperovskitesolar-cell-point-to-higher-efficiency.html) (дата звернення 22.10.2024).
11. Paper-thin solar cell can turn any surface into a power source: веб-сайт.
URL:<https://news.mit.edu/2022/ultrathin-solar-cells-1209> (дата звернення 25.10.2024).
12. Рашид Д.; Тетяна П.; Нікола П.; Володимир Г. Огляд поточного стану гнучких сонячних панелей і фотоелектричних матеріалів. Кафедра фізики, факультет електротехніки та комунікацій, Технологічний університет Брно, 2023, *16(17)*, 5839. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175839>.
13. Aybüke T.; Tuğçe K.; Başak K. K.; Zeynep D. A. Multi-objective evolutionary optimization of photovoltaic glass for thermal, daylight, and energy consideration, *Solar Energy*, 2023, Vol.264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112070>
14. Прозорі сонячні панелі та їх застосування в сучасній архітектурі: веб-сайт.
URL: <https://wattmasters.com/transparent-solar-panels/> (дата звернення 26.10.2024)
15. Parageorgas P., Piromalis D., Antonakoglou K., Vokas G., Tseles D., Arvanitis K.G. Smart Solar Panels: In-situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks, *Energy Procedia*, 2013, Vol.36, P. 535-545/ DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.062>
16. Giulia U.; Michele Z. Experimental assessment of the heat mitigation potential of an urban cooling shelter: Combining water misting with solar shading, wind shield, and smart control. *Energy and Buildings*. 2023, Vol. 299, 113623 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113623>
17. Seungyong H.; Mengmeng C.; Duy P. P.; Suresh K. D.; Junsin Y. Comparison of different approaches to texturing monocrystalline silicon wafers for solar cell applications, *Surface Science*, 2024, Vol. 748, 122540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susc.2024.122540>

18. Shahariar C., Kazi S. R., Tanjia C. et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling, *Energy Strategy Reviews*, 2020, Vol.27, 100431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
19. Shubham K., Janaki S. R., Arpit S., Ashish K. Solar energy advances and CO2 emissions: A comparative review of leading nations' path to sustainable future. 2024. Vol.475, 143598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143598>.
20. Jamal J.; Piyas M.; Adam R.; Musrady M.; Muhammad D. M.; Marwan M.; Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system, *Results in Engineering*, 2024, Vol.21, 101878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101878>.
21. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об'єктів: веб сайт. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek> (дата звернення 31.10.2024).
22. В Україні зросла кількість домогосподарств, які встановили сонячні панелі: веб-сайт. URL: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/en/news/v-ukrayini-zrosla-kilkist-domogospodarstv-yaki-vstanovyly-sonyachni-paneli/>. (дата звернення: 1.11.2024).
23. Українці вийшли на рекорд за кількістю встановлених сонячних батарей: веб-сайт. URL: <https://www.unian.ua/economics/energetics/ukrajinci-viyshli-na-rekord-za-kilkistyu-vstanovlenih-sonyachnih-batarey-novini-sogodni-11675359.html>. (дата звернення: 3.11.2024).
24. Сонячна енергетика в Україні : веб-сайт. URL: <https://avenston.com/articles/solar-in-ukraine-2019/> (дата звернення: 2.11.2024).
25. Аналіз ринку сонячних батарей і сонячної енергетики в Україні: веб-сайт. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-solnechnyh-batarej-i-solnechnoj-energetiki-v-ukraine-2019-god> (дата звернення 3.11.2024).

- 26.Перспективи сонячного ринку на 2021-2025 роки: веб-сайт. URL: <https://avenston.com/articles/global-solar-outlook-2021-2025/> (дата звернення 3.11.2024).
- 27.Вартість і окупність сонячної електростанції в 2020 році: веб-сайт. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/a403701-stoimost-okupaemost-solnechnoj.html> (дата звернення 3.11.2024).
- 28.Як змінилися ціни на сонячні панелі за останні роки — аналітика OLX: веб-сайт. URL:<https://psm7.com/uk/analytics/yak-zminylsya-cziny-na-sonyachni-paneli-za-ostanni-roky-analytika-olx.html>.(дата звернення 4.11.2024).
- 29.Динаміка цін на Longi Solar LR5-72HTH-585M:веб-сайт. URL:https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/longi-solar-lr5-72hth-585m/?tab=about&chart=true.(12.11.2024)
- 30.Basil C.; Madhuri W, A comprehensive investigation on the electrochemical performance, synthesis, modification, and recycling methods of LiFePO₄ for sustainable future, *Journal of Energy Storage*, 2024 Vol. 98, 11285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.11285>.
- 31.Літій залізо фосфатні акумулятори LiFePO₄:веб-сайт.URL: <https://energy-dk.com.ua/litii-zalizo-fosfatni-akumulatory-lifepo4/> (дата звернення 14.11.2024).
- 32.Серія LT (LiFePO₄):веб-сайт. URL: <https://ads.ua/ua/lt-lifepo4> (дата звернення 15.11.2024).
- 33.[М. А. Мащенко, М. С. Бріль, О. М. Кліменко та ін.; за заг. ред. д-ра екон. наук, доц. М. А. Мащенко Економічна теорія:навчальний посібник для самостійної роботи студентів. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2022, 266 с.](#)
- 34.Паніна Н.В. Технологія соціологічного дослідження: *навчальний посібник* Київ: НАНУ, 2007,320 с.
- 35.В. В. Добровольський, Є. М. Безсонов, Г. В. Непеїна, Д. О. Крисінська, Н. А. Сербулова. Стратегії сталого розвитку : *навч. посіб.* Миколаїв:Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021, 160 с.