

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вишого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОНТЕКСТІ
ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ»**

Виконала: студента групи ТЗД-216
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» червня 25 Кушнір Д. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: професор кафедри ЕХТЗД, д.т.н.,
професор

«10» червня 25 Петрук В. Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: к.х.н., доцент кафедри ЕХТЗД

«10» червня 25 Тітов Т.С.
(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доц. Іщенко В.А.
(прізвище та ініціали)

«10» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Спеціальність 183 – «Технології захисту навколишнього середовища»

Освітньо-професійна програма – Інженерна екологія та ресурсозберігаючі технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕХТЗД

К.Т.Н., доцент

В.А. Іщенко

(підпис)

« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студентці

Кушнір Дмитро В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОНТЕКСТІ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ»

керівник роботи Петрук Василь Григорович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи

Порівняння різних сонячних елементів (табл. 3.1)

4. Зміст текстової частини

1. Аналіз сучасного стану декарбонізації.
2. Аналіз планарної технології у виробництві кремнію для сучасних сонячних панелей.
3. Інноваційні технології виробництва некремнієвих тонкоплівкових фотопанелей.
4. Конструктивні особливості сонячних електростанцій.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Майбутні викиди парникових газів за трьома сценаріями
2. Знищення природних площ внаслідок обстрілів та пересування військової техніки.
3. Порівняння джерел енергії в Україні та Європі станом на 2023 рік

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 25 » березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Аналіз сучасного стану декарбонізації.	25.03.2025	07.04.2025	викон
2	Аналіз планарної технології у виробництві кремнію для сучасних сонячних панелей.	07.04.2025	27.04.2025	викон
3	Інноваційні технології виробництва некремнієвих тонкоплівкових фотопанелей.	27.04.2025	12.05.2025	викон
4	Конструктивні особливості сонячних електростанцій.	12.05.2025	26.05.2025	викон
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.05.2025	05.06.2025	викон
6	Підготовка презентації та доповіді на захист БКР	05.06.2025	10.06.2025	викон

Студент Ді
(підпис)

Кушнір Д. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи Петрук В. Г.
(підпис)

Петрук В. Г.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота складається з 96 сторінок формату А4, на яких є 4 таблиці, 5 графіків, список використаних джерел містить 89 найменувань.

Метою роботи є аналіз сонячної генерації в контексті декарбонізації вінницької області.

Бакалаврська кваліфікаційна робота зосереджена на оцінці сучасних тенденцій декарбонізації економіки та природоохоронних технологій України і світу. Розглянуті, планарні технології у виробництві кремнію для сучасних сонячних панелей. Проведено аналіз конструктивних особливостей сонячних електростанцій.

Ключові слова: сонячна генерація, декарбонізація, планарна технологія, вплив.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 94 A4-format pages, which include 5 tables, 5 graphs, and a list of references containing 89 sources.

The objective of the thesis is to analyze solar power generation in the context of the decarbonization of the Vinnytsia region.

The bachelor's qualification paper focuses on assessing current trends in economic decarbonization and environmental technologies in Ukraine and worldwide. It examines planar technologies in silicon production for modern solar panels and analyzes the structural features of solar power plants.

Keywords: solar power generation, decarbonization, planar technology, impact.

ВІДГУК

наукового керівника на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента денної форми навчання групи ТЗД-216 Кушніра Дмитра В'ячеславовича на тему: "Екологічна безпека сонячної генерації в контексті декарбонізації Вінницької області"

Бакалаврська кваліфікаційна робота Кушніра Д.В. присвячена актуальній темі, що поєднує проблеми екологічної безпеки та декарбонізації енергетики – ключових напрямів сучасної екологічної політики. У роботі проведено детальний аналіз технологій сонячної генерації, оцінено їхній вплив на навколишнє середовище, розглянуто технічні особливості фотопанелей і сонячних електростанцій.

Студент продемонстрував достатню теоретичну підготовку, вміння працювати з джерелами інформації, робити логічні висновки, аргументовано формулювати пропозиції щодо підвищення екологічної ефективності сонячної енергетики у Вінницькій області. Робота містить значний обсяг аналітичного матеріалу, виконана згідно з вимогами до кваліфікаційних робіт, має практичну цінність та потенціал для подальших досліджень.

Кушнір Д.В. виконав поставлені завдання у достатньому обсязі, продемонстрував ініціативність та відповідальне ставлення до наукової роботи.

Вважаю, що дана робота заслуговує на оцінку «добре» (В за шкалою ECTS), а її автор – на присвоєння кваліфікації бакалавра за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища»..

Науковий керівник:

д.т.н., професор, Заслужений
природоохоронець України



Василь ПЕТРУК

РЕЦЕНЗІЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента 4 курсу групи ТЗД-216 спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища Кушніра Дмитра В'ячеславовича на тему: «Екологічна безпека сонячної генерації в контексті декарбонізації Вінницької області»

Бакалаврська кваліфікаційна робота Кушніра Д.В. присвячена надзвичайно актуальній темі, що стосується впровадження екологічно безпечних технологій у контексті глобальної та регіональної декарбонізації. Автор чітко визначив мету дослідження — аналіз потенціалу та екологічних аспектів сонячної генерації у Вінницькій області як одного зі стратегічних напрямів забезпечення сталого розвитку.

Робота характеризується логічною структурою, що охоплює ключові аспекти теми: від загальносвітових тенденцій декарбонізації до технічних характеристик сонячних електростанцій та аналізу їх впливу на довкілля. Зміст розкритий на достатньому теоретичному і прикладному рівнях, з використанням актуальних наукових джерел і статистичних даних. Особливо варто відзначити глибокий огляд планарних технологій виробництва кремнію, інноваційних тонкоплівкових фотоелементів, а також ретельний аналіз специфіки сонячної генерації у регіональному контексті.

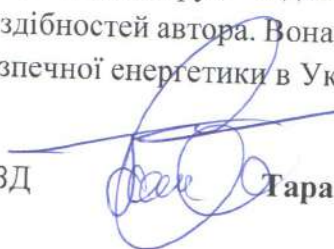
Графічні матеріали, таблиці та діаграми вдало доповнюють основний текст і сприяють кращому розумінню дослідження. Оформлення пояснювальної записки відповідає вимогам чинних стандартів.

Незначним зауваженням є відсутність більш глибокої оцінки впливу життєвого циклу сонячних панелей на довкілля, що могло би розширити екологічний аналіз.

У цілому, робота Кушніра Дмитра В'ячеславовича є самостійною, науково обґрунтованою працею, яка демонструє задовільний рівень теоретичної підготовки та аналітичних здібностей автора. Вона має практичну значущість для розвитку екологічно безпечної енергетики в Україні.

Оцінка: добре (B, ECTS)

Рецензент: к.х.н., доцент кафедри ЕХТЗД

 Тарас ТІТОВ

Зміст

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ І СВІТУ	4
1.1 Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації економіки та природоохоронних технологій України і світу	4
1.2 Ефективність інноваційних енергозберігаючих технологій та природоохоронних заходів в об'єктах соціальної інфраструктури	12
1.3 Стан декарбонізації та розвитку сонячної енергетики у Вінницькій області	19
2 АНАЛІЗ ПЛАНАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ КРЕМНІЮ ДЛЯ СУЧАСНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	28
2.1 Основи планарної технології у виробництві кремнію	28
2.2 Процес виробництва кремнію для сонячних панелей	32
2.3 Метод Чохральського: вирішальний крок у вирощуванні кристалів кремнію	37
3 ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НЕКРЕМНІЄВИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ ФОТОПАНЕЛЕЙ.....	40
3.1 Технології виробництва тонкоплівкових сонячних панелей без кремнію	40
3.2 Типи тонкоплівкових фотоелектричних панелей	47
3.3 Потенціал для майбутнього зростання та впровадження	53
4 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	56
4.1 Комплексний огляд сонячних фотоелектричних технологій	56
4.2 Передові концепції збору сонячної енергії.....	61
4.3 Стратегічне впровадження систем сонячної генерації.....	65
4.4 Утилізація сонячних панелей	69
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
ДОДАТОК А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	Error! Bookmark not defined.
ДОДАТОК Б.....	84

ВСТУП

Сучасний світ стикається з глобальними викликами, серед яких зміна клімату, виснаження природних ресурсів та необхідність переходу до низьковуглецевої економіки займають центральне місце. Декарбонізація, як ключовий напрям сталого розвитку, передбачає скорочення викидів парникових газів та поступову відмову від викопного палива на користь відновлюваних джерел енергії. У цьому контексті сонячна генерація набуває особливого значення, адже вона є одним із найбільш перспективних і екологічно чистих способів виробництва електроенергії.

Вінницька область, завдяки своїм природним умовам і стратегічному розташуванню, має значний потенціал для розвитку сонячної енергетики. Однак реалізація цього потенціалу вимагає комплексного підходу, який враховує як економічні, так і екологічні аспекти.

Метою даної бакалаврської роботи є аналіз екологічної безпеки сонячної генерації як складової декарбонізації Вінницької області з урахуванням сучасних технологій виробництва фотопанелей та конструктивних особливостей сонячних електростанцій. У першому розділі буде розглянуто сучасний стан декарбонізації в Україні та світі, а також економічні передумови її впровадження. Другий розділ присвячений планарній технології виробництва кремнію, що є основою сучасних фотопанелей. У третьому розділі досліджуються інноваційні технології створення некремнієвих тонкоплівкових фотопанелей, які можуть стати альтернативою традиційним рішенням. Нарешті, четвертий розділ аналізує конструктивні особливості сонячних електростанцій, їх вплив на довкілля та шляхи підвищення екологічної ефективності.

Таким чином, робота спрямована на комплексне вивчення екологічних аспектів сонячної генерації, що сприятиме розробці рекомендацій для сталого розвитку енергетичного сектору Вінницької області в умовах глобальної декарбонізації.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ І СВІТУ

1.1 Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації економіки та природоохоронних технологій України і світу

Декарбонізація — це системний процес скорочення викидів діоксиду вуглецю (CO_2) та інших парникових газів в атмосферу з метою досягнення вуглецевої нейтральності або навіть негативного вуглецевого сліду.

Цей процес передбачає фундаментальну трансформацію економічних секторів через перехід від викопного палива до відновлюваних джерел енергії, впровадження енергоефективних технологій та оптимізацію виробничих процесів. Декарбонізація охоплює всі сфери людської діяльності: енергетику, транспорт, промисловість, будівництво, сільське господарство та побутове споживання.

Основними інструментами декарбонізації є розвиток сонячної та вітрової енергетики, електрифікація транспорту, впровадження технологій захоплення та зберігання вуглецю, підвищення енергоефективності будівель, а також розвиток циркулярної економіки. Важливу роль відіграють також природні рішення, такі як лісовідновлення та відновлення екосистем [89].

Декарбонізація стала ключовим елементом глобальної кліматичної політики після підписання Паризької угоди 2015 року. Більшість країн світу взяли на себе зобов'язання досягти вуглецевої нейтральності до 2050 року, що вимагає радикального переосмислення традиційних економічних моделей та масштабних інвестицій у зелені технології. Паралельно скорочується біорізноманіття (у 1950-1960-х роках на планеті зникав один вид тварин чи рослин на рік, сьогодні — більше одного виду на день). Океани нагріваються та задихаються від нафти та пластикового сміття. На жаль, перелік екологічних загроз нескінченний. Отже, людство не має іншого вибору, як обрати шлях розвитку, який не передбачає викидів вуглецю. Інакше кажучи, альтернативи декарбонізації та екомодернізації економіки не існує [1].

Проблема полягає в тому, що зміни клімату, спричинені людською діяльністю, стають глобальними та незворотними, загрожуючи існуванню живих систем. Тому декарбонізація енергетики зокрема та економіки загалом є єдиний вихід для людства в найближчому майбутньому. Разом з тим декарбонізація ЄС, України та світового енергетичного сектору – надзвичайно складне завдання. До 2050 року Європа має стати кліматично нейтральним континентом. Згідно з багатьма науковими дослідженнями та публікаціями вчених з усього світу, до 2025 року для цього необхідно щонайменше 1 трильйон євро. Хоча до 2027 року країнам, які працюють над декарбонізацією, буде виділено близько 100 мільярдів євро, більшість держав ще не готові до радикальної зміни традиційних технологій. Наприклад, Україна та Польща також не повністю підготовлені до такого переходу. Ні США, ні Китай, ні Росія не мають наміру поспішати з прийняттям рішучих кроків для планети та людства. Проте це має відбуватися відповідно до Європейської зеленої угоди, Метанової стратегії Європейської Комісії, Паризької угоди (2015), Кліматичного саміту в Глазго (2021) та багатьох інших фундаментальних угод та документів з цього надзвичайно важливого питання. Зокрема, ЄС планує запровадити податок на викиди та закрити понад 70% вугільних електростанцій до 2040 року. Зараз податок на викиди становить близько 2 долари за тонну викидів CO₂. До 2030 року ця цифра може зрости до 75 доларів.

Посилення впливу зміни клімату зумовило глобальний імператив для декарбонізації економіки, причому екологічні технології відіграють ключову роль у цьому переході. Міжнародні організації, такі як Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC), підкреслюють терміновість цього питання, заявляючи, що пік глобальних викидів парникових газів (ПГ) до 2025 року є критично важливим кроком, щоб зберегти межу в 1,5°C у межах досяжності [2]. Це вимагає негайних і суттєвих дій у всіх секторах. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) додатково наголошує на цій невідкладності у своєму звіті World Energy Transitions Outlook 2024, підкреслюючи, що, незважаючи на рекордне зростання розгортання відновлюваних джерел енергії, глобальний перехід в енергетику залишається недостатнім, тим самим підриваючи здатність досягти кліматичних

цілей, погоджених у Парижі [3]. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) повторює цю думку у своєму звіті World Energy Outlook 2024, визнаючи безпрецедентну швидкість, з якою чиста енергія надходить в енергетичну систему, визнаючи безпрецедентну швидкість, з якою чиста енергія надходить в енергетичну систему, переважно завдяки відновлюваним джерелам енергії, але також застерігаючи, що поточні політичні рішення все ще занадто часто сприяють збереженню нестійких практик [4]. Ці оцінки в сукупності вказують на критичний момент, коли, незважаючи на помітний прогрес, системна трансформація є важливою для узгодження зі стійким майбутнім. На рисунку 1.1 зображено майбутні викиди парникових газів за трьома сценаріями

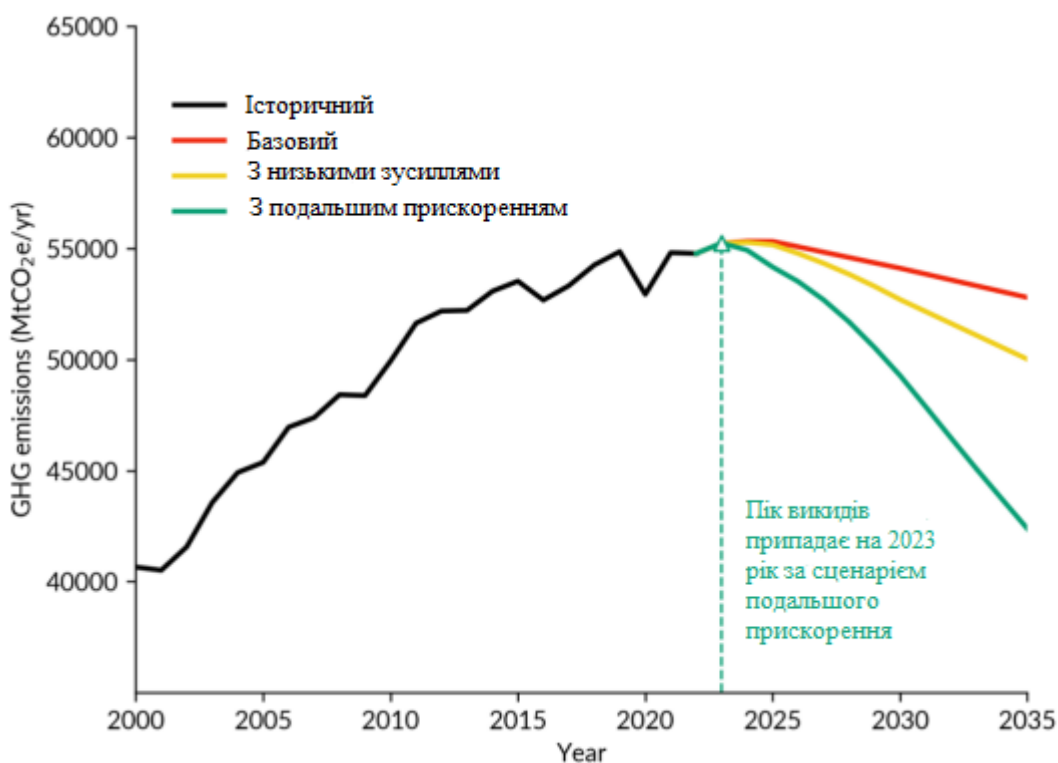


Рис 1.1 Майбутні викиди парникових газів за трьома сценаріями

У цьому глобальному контексті Україна стикається з унікальними обставинами, які суттєво впливають на її шлях декарбонізації. Триваючий конфлікт завдав серйозної шкоди енергетичній інфраструктурі країни, викликавши невідкладну та гостру потребу в її відбудові та модернізації [5]. Однак це спустошення дає Україні унікальну можливість стратегічно узгодити своє

відновлення з глобальними тенденціями декарбонізації. Крім того, відданість України європейській інтеграції вимагає гармонізації її енергетичної політики з політикою Європейського Союзу, зокрема щодо амбітної мети досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [6]. У світлі геополітичних реалій енергетична безпека також стала першорядною проблемою для України, розлягаючи перехід до відновлюваних і децентралізованих джерел енергії як питання стратегічного значення для національного суверенітету та стійкості [7]. Сукупність цих факторів свідчить про те, що Україна має потенціал не лише відновити свій енергетичний сектор, але й зробити це, щоб обійти традиційні моделі з інтенсивним використанням вуглецю на користь чистішої, стійкішої та інтегрованої в Європу системи.

Останні звіти провідних міжнародних організацій містять вичерпний огляд глобальних тенденцій декарбонізації. Висновки IPCC підкреслюють, що негайне досягнення піку глобальних викидів має важливе значення для обмеження потепління до $1,5^{\circ}\text{C}$ [2]. Аналіз показує, що якщо поточні тенденції зростання чистих технологій збережуться та буде досягнуто прогрес у скороченні викидів, не пов'язаних із CO_2 , існує значна ймовірність того, що глобальні викиди можуть почати падати вже у 2024 році, потенційно зробивши 2023 рік роком піку викидів. Прогнози MEA в його World Energy Outlook 2024 також вказують на потенційне зниження викидів викопного CO_2 до 2025 року, можливо, навіть у 2024 році [2]. Цей прогноз підкреслює прискорення темпів розгортання відновлюваної енергетики, у 2023 році у всьому світі було додано понад 560 ГВт відновлюваних джерел енергії [3]. Прогноз IRENA “Світові енергетичні переходи 2024” підтверджує це рекордне зростання відновлюваної енергетики, але попереджає, що загальний перехід на енергетику не досягне кліматичної цілі $1,5^{\circ}\text{C}$. У звіті наголошується на необхідності потроєння встановленої потужності відновлюваної електроенергії щонайменше до 11 000 ГВт до 2030 року, щоб узгодити цю критичну мету [4]. Global Electricity Review 2024 від Ember також підтверджує цю тенденцію, прогнозуючи незначне зменшення глобального виробництва викопного палива в 2024 році, з більш значними скороченнями, які очікуються в наступні роки, що свідчить про те, що

2023 рік, ймовірно, був піком викидів у енергетичному секторі [8]. Варто зазначити, що сонячна енергія визначена як провідна сила цієї революції, обігнавши вітер як найбільше джерело нової електроенергії другий рік поспіль у 2023 році [8]. На рисунку 1.2 можна спостерігати як сонячна енергетика випереджає зростання виробництва вітрової енергії у 2023 році другий рік поспіль.

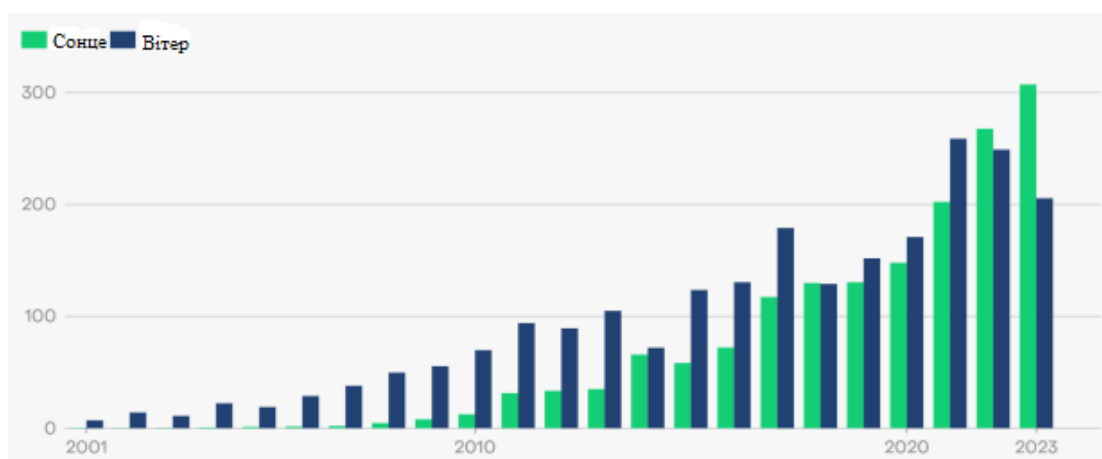


Рис 1.2 Річна зміна виробництва електроенергії (TВт·год)

Поряд із цими політичними та ринковими змінами, значні технологічні досягнення спонукають глобальні зусилля з декарбонізації. Аналіз десяти найкращих кліматичних змін 2024 року, проведений RMI, висвітлює кілька ключових напрямків, у тому числі зниження вартості та збільшення ємності акумуляторів, прогрес у екологічно чистих видах палива для судноплавства та авіації, поточний перехід від вугілля до екологічно чистих джерел енергії, покращення моніторингу, пом'якшення викидів метану, триваючий сплеск впровадження електромобілів та зростаючий перехід до енергоефективних теплових насосів для опалення та охолодження [9]. Аналіз Deloitte за 2024 рік також вказує на домінування сонячної та вітрової енергетики в комунальному масштабі в нових потужностях з виробництва електроенергії, на частку яких припадає майже 90% за перші дев'ять місяців року [10]. Фірма очікує продовження імпульсу впровадження чистої енергії у 2025 році, що сприятиме зростанню виробництва чистих технологій, зростаючій інтеграції штучного інтелекту (ШІ) та розвитку технологій уловлювання

вуглецю [10]. Оцінка тенденцій кліматичних технологій на 2025 рік від Carbon Trail наголошує на прогресі в технологіях уловлювання вуглецю, зростаючій ролі штучного інтелекту та машинного навчання у вирішенні кліматичних проблем, триваючій електрифікації транспорту, інноваціях у циклічній економіці та скороченні відходів, а також на розвитку розумних методів сільського господарства [11]. Прогноз Zeigo на 2025 рік підкреслює очікуване зростання попиту на акумуляторні батареї технології для управління переривчастістю відновлюваних джерел, таких як сонце та вітер [12]. Крім того, Zeigo наголошує на економічній ефективності заходів з енергоефективності, таких як впровадження світлодіодного освітлення, інтелектуальних мереж і енергоефективних систем HVAC, як ключових стратегій декарбонізації [12]. Світовий економічний форум також підкреслює значне зростання інвестицій у чисту енергію в усьому світі, зростаючі потреби штучного інтелекту в енергії, що зумовлює потребу у швидкому розгортанні чистої енергії, потенційне відродження ядерної енергетики та постійне зосередження на дослідженнях і розробках передових енергетичних рішень [13]. Ці технологічні досягнення в різних секторах мають вирішальне значення для забезпечення переходу до економіки з низьким вмістом вуглецю та досягнення глобальних кліматичних цілей.

До повномасштабного вторгнення Україна вже продемонструвала прихильність розвитку відновлюваної енергетики. У 2019 році відновлювані джерела енергії становили 8,1% від загальної енергетичної системи країни. Встановлена потужність відновлюваної енергетики досягла 9,9 ГВт на початок 2022 року, з яких сонячна енергія становила 6 ГВт і енергія вітру — 2 ГВт, що становило значну частину цієї потужності. Україну також визнали привабливим місцем для інвестицій у відновлювану енергетику, посідаючи восьме місце у світі за інвестиційною привабливістю в «зеленому» енергетичному секторі у 2019 році. Щоб стимулювати це зростання, уряд запровадив систему «Зеленого тарифу», яка заохочувала приватних власників, у тому числі домогосподарства, інвестувати та встановлювати власні об'єкти виробництва відновлюваної енергії, такі як сонячні батареї та невеликі вітрові турбіни, щоб продавати електроенергію державі [14]. Ця

політика сприяла помітному збільшенню потужностей відновлюваної енергії та продемонструвала початковий імпульс до більш сталого енергетичного балансу. У 2023 році частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі виробництва електроенергії України, включаючи великі гідроелектростанції, досягла 22%, тоді як у Європі цей показник становив 42% (Рисунок 1.3)

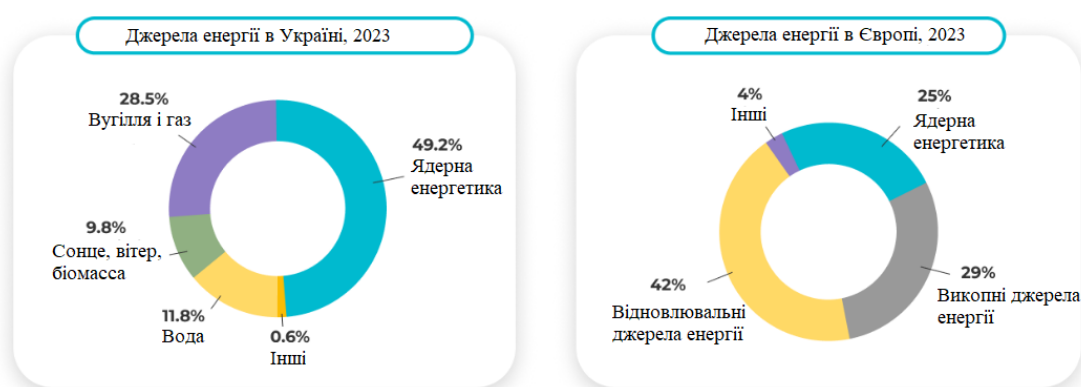


Рис 1.3 Порівняння джерел енергії в Україні та Європі станом на 2023 рік

Конфлікт, що триває, мав глибокий і згубний вплив на зусилля України з декарбонізації та її енергетичну інфраструктуру. З початку 2024 року російські атаки посилюються на українські енергетичні об'єкти, що призвело до знищення потужностей понад 9 ГВт [5]. Ці атаки непропорційно вплинули на теплові та гідроелектростанції, але деякі менші сонячні фотоелектричні установки та критичні підстанції також зазнали обстрілу [15]. До середини 2024 року приблизно 30% загальної сонячної фотоелектричної потужності України було пошкоджено внаслідок війни, причому значна частина розташована на окупованих територіях або з невідомим робочим статусом [16]. Окрім прямої шкоди інфраструктурі в Україні, конфлікт також мав ширші наслідки для глобальної декарбонізації. Перебої в постачанні енергії, особливо з Росії до Європи, одразу після вторгнення призвели до тимчасового збільшення використання більш вуглецевих джерел енергії, таких як вугілля, нафта та природний газ, з інших частин світу [17]. Це підкреслює, яким чином геополітична нестабільність може вплинути на глобальні зусилля зі скорочення викидів, навіть попри продовження довгострокової тенденції до декарбонізації. Руйнування промислового сектора України, життєво важливого для

виробництва сталі, вугілля та сільського господарства, також змінило профіль викидів країни, причому скорочення в деяких областях потенційно компенсується збільшенням викидів через неефективність використання енергії та військову діяльність [17]. Загальний вплив війни став суттєвою перешкодою для енергетичного сектору України та її шляху до низьковуглецевого майбутнього, водночас вплинувши на глобальні енергетичні ринки та тенденції викидів.

Незважаючи на величезні виклики, пов'язані з триваючим конфліктом, Україна продовжує розвивати та вдосконалювати свою політику та нормативно-правову базу для підтримки відновлюваної енергетики та енергоефективності. Країна прийняла Національний енергетичний і кліматичний план (NECP), який розрахований на 2030 рік, в якому окреслено ключові цілі для приведення енергетичного сектора у відповідність до цілей декарбонізації Європейського Союзу. Важливою метою в рамках NECP є збільшення частки відновлюваної енергії у валовому кінцевому споживанні енергії щонайменше до 27% до 2030 року [6]. Крім того, влітку 2023 року Україна прийняла Закон про зелений перехід, який має на меті гармонізувати своє законодавство з нормативно-правовою базою Енергетичного Співтовариства щодо відновлюваної енергії, що свідчить про зобов'язання щодо довгострокового сталого розвитку [18]. Фонд декарбонізації України, що функціонує як акціонерне товариство з січня 2024 року, має чітку мету сприяння декарбонізації національної економіки шляхом фінансової підтримки відповідних проектів [19]. Для подальшого сприяння розгортанню відновлюваної енергетики уряд прийняв рішення щодо аукціонів для розподілу квот на відновлювану енергію, причому пілотні онлайн-аукціони заплановано на сонячні та вітрові потужності у 2024 році [20]. Ці триваючі зусилля у сфері політики та регулювання підкреслюють рішучість України рухатися до «зеленого» відновлення та інтегрувати свою енергетичну систему з Європою, навіть попри складну поточну геополітичну ситуацію.

Міжнародна підтримка та спільні ініціативи відіграють вирішальну роль у зміцненні зусиль України щодо зеленого відновлення. Європейський Союз та різноманітні міжнародні донори пообіцяли надати значну фінансову та технічну

допомогу енергетичному сектору України. Ключовим інструментом цієї підтримки є Фонд енергетичної підтримки ЄС, який накопичив понад 500 мільйонів євро на терміновий ремонт і технічне обслуговування енергетичної інфраструктури [6]. Цей фонд також сприяє встановленню сонячних фотоелектричних (PV) систем у лікарнях по всій Україні, забезпечуючи більш стійке електропостачання критичної соціальної інфраструктури [21]. Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) заснував Програму кредитування сталої енергетики в Україні (USELF), яка спрямована на підтримку проектів у сфері відновлюваної енергетики, інвестицій в енергоефективність та відповідних рішень для накопичення енергії для різних бенефіціарів, включаючи МСП, муніципалітети та житлових позичальників [22]. Крім того, співпраця між неурядовими організаціями та міжнародними організаціями також є важливою. Наприклад, Greenpeace і SolarPower Europe оголосили про партнерство з метою прискорення розгортання сонячних фотоелектричних систем по всій Україні в рамках сталої реконструкції країни та підвищення її довгострокової енергетичної стійкості [23]. Ці приклади підкреслюють міцну міжнародну солідарність і узгоджені зусилля, спрямовані на допомогу Україні у відновленні її енергетичного сектору сталим і стійким способом.

1.2 Ефективність інноваційних енергозберігаючих технологій та природоохоронних заходів в об'єктах соціальної інфраструктури

У всьому світі ряд інноваційних енергозберігаючих технологій застосовуються до проектів соціальної інфраструктури, щоб підвищити стійкість і зменшити викиди вуглецю. Ці технології пропонують значний потенціал для підвищення енергоефективності в різних типах будівель і систем. Принципи пасивної сонячної конструкції, які використовують орієнтацію будівлі та теплову масу для оптимізації використання сонячної енергії, можуть суттєво зменшити потреби в енергії для опалення та охолодження. Високоєфективна ізоляція з використанням передових матеріалів для мінімізації передачі тепла може призвести до значного зниження

споживання енергії для опалення та охолодження. Подібним чином, енергоефективні вікна, що включають кілька склінь і покриттів, можуть зменшити потребу в енергії для опалення та охолодження. Прийняття світлодіодного освітлення, яке забезпечує суттєву економію енергії порівняно з традиційними лампочками, набуває широкого поширення в проектах соціальної інфраструктури. Технології розумних будівель, що включають пристрої IoT для моніторингу та керування енергією в режимі реального часу, дозволяють оптимізувати використання енергії залежно від зайнятості та інших факторів [24]. Конструкції природної вентиляції максимізують потік повітря, зменшуючи залежність від енергоємних систем HVAC у відповідних кліматичних умовах. Інтеграція локальних систем відновлюваної енергії, сонячна, вітрова або геотермальна, дозволяє децентралізоване виробництво енергії та зменшує залежність від мережі. Зелені дахи та стіни забезпечують ізоляцію та управління теплом, сприяючи підвищенню енергоефективності. Системи управління енергією, що використовують програмне забезпечення для моніторингу та оптимізації використання енергії, допомагають виявити неефективність та сприяти сталим практикам. Нарешті, біокліматичний дизайн адаптує проект будівлі до місцевого клімату, використовуючи природні ресурси для енергоефективності. Окрім технологій для конкретних будівель, інтелектуальні мережі відіграють вирішальну роль в оптимізації споживання електроенергії в містах шляхом інтеграції відновлюваних джерел енергії та надання даних у режимі реального часу для ефективного розподілу та управління енергією. Використання інноваційних та енергоефективних будівельних матеріалів додатково сприяє зменшенню загального споживання енергії та впливу соціальної інфраструктури на навколишнє середовище [25]. Теплові насоси, які набули значної популярності в усьому світі, представляють собою вискоелефективну технологію як для опалення, так і для охолодження в будівлях [26]. Вони є різноманітними технологічними досягненнями, що пропонують комплексний набір інструментів для підвищення стійкості та зменшення вуглецевого сліду проектів соціальної інфраструктури в усьому світі. Очікується, що між 2024 і 2030 роками використання

відновлюваної енергії в транспортному, теплоенергетичному та енергетичному секторах зросте майже на 60% (Рисунок 1.3)

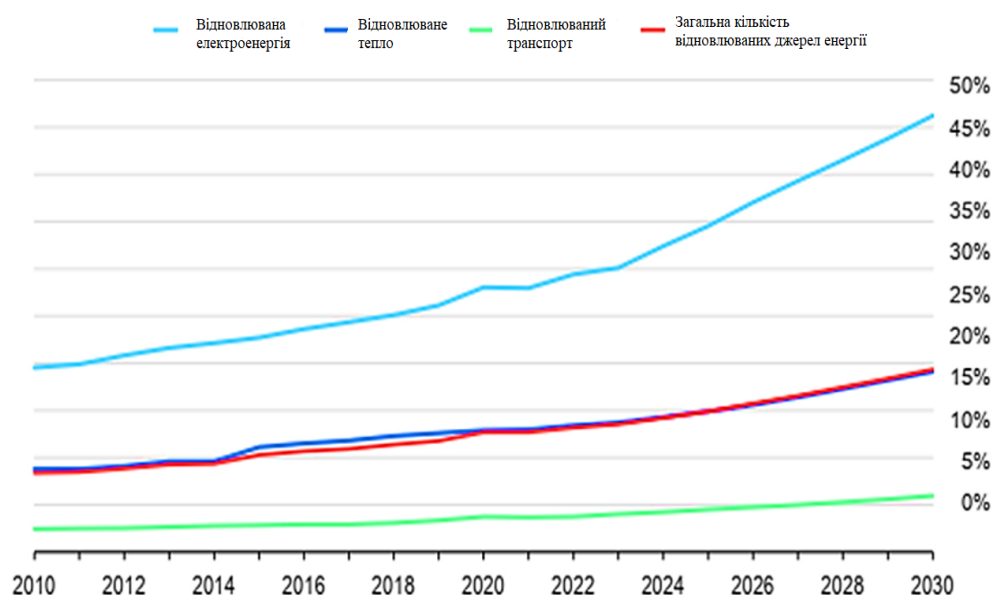


Рис 1.4 Частка відновлюваної енергії у світовому кінцевому споживанні енергії за секторами

Впровадження екологічних заходів у проекти соціальної інфраструктури продемонструвало значну ефективність у зниженні викидів вуглекислого газу в усьому світі. Наприклад, підвищення енергоефективності в житлових і комерційних будівлях у Сполучених Штатах призвело до помітного скорочення викидів парникових газів [27]. МЕА підкреслює, що енергоефективність відіграє центральну роль у боротьбі зі зміною клімату, і оцінює, що впровадження всіх економічно ефективних заходів з енергоефективності може призвести до піку викидів ПГ, пов'язаних з енергетикою, до 2020 року та значного скорочення до 2040 року [28]. Декарбонізація будівель, яка передбачає систематичне скорочення викидів вуглецю з будівель шляхом переходу на чисті джерела енергії та підвищення енергоефективності, визнана ключовою стратегією для досягнення кліматично стійкого майбутнього [29]. Показано, що глибока модернізація існуючих будівель, яка передбачає капітальну реконструкцію для значного покращення енергоефективності, призводить до зменшення викидів вуглецю на 50-75%

порівняно з будівництвом нових будівель. Приклади з дослідження надати переконливі докази впливу цих заходів. Глибока модернізація комплексу MacKimmie в Університеті Калгарі, наприклад, досягла 80% скорочення енергоспоживання та сертифікації дизайну з нульовим викидом вуглецю завдяки таким заходам, як наземні теплові насоси та сонячні фотоелектричні панелі на даху [30]. Подібним чином Проект енергоефективності громадських будівель Києва в Україні модернізував понад 1200 громадських будівель, у тому числі заклади охорони здоров'я та освіти, що призвело до значної економії тепла [31]. Ці приклади підкреслюють відчутні переваги впровадження енергозберігаючих технологій і екологічних заходів у соціальній інфраструктурі для досягнення суттєвого скорочення вуглецевого сліду та сприяння стійкості.

Впровадження цих інноваційних технологій та природоохоронних заходів у соціальну інфраструктуру України є як специфічними потребами, так і значними викликами. Існуючий будівельний фонд України часто характеризується своїм віком і неефективністю, що призводить до особливо високого споживання енергії для опалення, яке може становити значну частину загального споживання енергії в країні [32]. Триваюча війна ще більше загострила ці проблеми, завдавши значної шкоди соціальній інфраструктурі, включаючи житлові будинки, лікарні та школи, що вимагає значних зусиль з реконструкції [33]. Цей етап відновлення пропонує критичну можливість для інтегрувати енергоефективні конструкції та технології з самого початку, гарантуючи, що нова інфраструктура є більш стійкою та стійкою. Розуміючи цей потенціал, український уряд заснував Український фонд енергоефективності (УФЕ), який надає гранти об'єднанням власників житла для підтримки енергоефективної реконструкції житлових будинків [34]. Крім того, міжнародні організації, такі як НЕФКО, активно підтримують проекти з енергоефективності в Україні, включаючи реконструкцію шкіл, лікарень та інших громадських будівель, спрямовані на зменшення споживання енергії та покращення якості послуг [35]. Хоча ці ініціативи представляють собою важливих кроків вперед, Україна все ще стикається з такими проблемами, як обмежені фінансові ресурси, потенційна нестача кваліфікованої робочої сили для впровадження цих технологій, а

також потреба в постійній політичній підтримці та міжнародній допомозі для повної реалізації потенціалу підвищення стійкості своєї соціальної інфраструктури.

Розумні електромережі представляють собою одну з найперспективніших інновацій для оптимізації споживання електроенергії в міській та соціальній інфраструктурі. Ці передові системи об'єднують відновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, додаючи гнучкості та ефективності мережам розподілу енергії [25]. Можливості передачі даних у режимі реального часу в інтелектуальних мережах дозволяють споживачам ефективніше керувати попитом на енергію та зменшувати втрати, створюючи як екологічні, так і економічні вигоди.

Значною перевагою технології розумних електромереж є її розширені можливості обслуговування та виявлення несправностей. Забезпечуючи дистанційний ремонт і діагностику, ці системи скорочують час простою та експлуатаційні витрати, зводячи до мінімуму витрати енергії [25]. Ця функція особливо цінна в умовах соціальної інфраструктури, таких як лікарні, школи та громадські будівлі, де безперервність обслуговування є важливою, а оптимізація ресурсів може дати значну економію.

Впровадження інтелектуальних мереж узгоджується із заявленими цілями України щодо підвищення стабільності енергетичної системи, децентралізації та цифровізації [36]. Ці цілі набули більшої актуальності у світлі російських атак на централізовану енергетичну інфраструктуру, які продемонстрували вразливість традиційних енергетичних систем під час конфлікту. Розподілений характер технології розумних електромереж забезпечує більшу стійкість проти таких загроз.

Розробка та застосування енергоефективних будівельних матеріалів є ще одним важливим шляхом для зменшення викидів вуглецю в соціальній інфраструктурі. Інноваційні матеріали для таких застосувань, як сонячні панелі, турбіни та ізоляція, можуть значно покращити енергетичну ефективність будівель, одночасно зменшуючи експлуатаційні витрати [25]. Ці матеріали все частіше застосовуються як у проектах нового будівництва, так і в проектах модернізації громадських об'єктів.

Принципи енергоефективного проектування будівель доповнюють ці передові матеріали, створюючи комплексні рішення, які мінімізують споживання енергії протягом життєвого циклу конструкції. Ці підходи особливо актуальні для відбудовних зусиль в Україні, де тисячі будівель та елементів інфраструктури потребують відновлення після пошкоджень, завданих під час війни. Включення енергоефективності на етапі проектування дає можливість «побудувати краще» з екологічністю в основі.

Економічні переваги енергоефективних будівель виходять за рамки зниження експлуатаційних витрат. Нерухомість із екологічними сертифікатами часто має вищу цінність і привертає більший інтерес з боку орендарів та інвесторів, створюючи ринкові стимули для практики сталого будівництва. Ця фінансова мотивація може допомогти прискорити впровадження енергоефективних технологій як у державних, так і в приватних проектах соціальної інфраструктури.

Російсько-українська війна підкреслила вразливість централізованої енергетичної інфраструктури до цілеспрямованих атак. Російські війська постійно атакували енергетичні об'єкти України, змушуючи компанії постійно перебудовуватися та тижнями витримувати електроенергію [37]. Ця ситуація прискорила перехід до більш децентралізованих екологічно чистих енергетичних рішень, які забезпечують більшу стійкість.

Децентралізовані енергетичні системи, зокрема сонячну та вітрову, виявилось важче повністю вивести з ладу цілеспрямованими ударами. Розподілений характер цих технологій дозволяє швидше відновлювати електроенергію порівняно з великими централізованими тепловими станціями [37]. Ця продемонстрована стійкість робить децентралізовану відновлювану енергію особливо цінною для критичної соціальної інфраструктури, такої як лікарні, служби екстреної допомоги та водоочисні споруди, які повинні підтримувати роботу під час криз.

Для оцінки складових загальної ефективності енергозберігаючих заходів у сфері теплопостачання використовуються такі показники:

– для **енергетичного ефекту** E_I : абсолютне – ΔQ (кВт·год) та відносне – δQ (%) значення заощадженої кількості теплової енергії за розрахунковий період, що визначаються за наступними формулами:

$$\Delta Q = Q_{\text{tot1}} - Q_{\text{tot2}} \quad (1.1)$$

де Q_{tot1} та Q_{tot2} – сумарні тепловтрати через огорожувальні конструкції будівлі за розрахунковий період до та після впровадження енергозберігаючих заходів відповідно, кВт·год;

$$\delta Q = \frac{Q_{\text{tot1}} - Q_{\text{tot2}}}{Q_{\text{tot1}}} \cdot 100\% ; \quad (1.2)$$

– для **екологічного ефекту** E_{II} : маса (об'єм) заощадженого палива – ΔM_{fuel} (кг) (ΔV_{fuel} (м³)), зменшення кількості викидів парникових газів, зокрема – CO₂ та забруднюючих речовин – ΔM_p (кг):

$$\Delta M_{\text{fuel}} = 3,6 \cdot \frac{\Delta Q}{Q_I} , \quad (1.3)$$

де Q_I – нижня теплота згоряння палива що використовується для виробництва теплової енергії, МДж/кг;

$$\Delta V_{\text{fuel}} = \frac{\Delta M_{\text{fuel}}}{\rho_{\text{fuel}}} , \quad (1.4)$$

де ρ_{fuel} – густина палива що використовується для виробництва теплової енергії, кг/м³;

$$\Delta M_{\text{zp}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot K_p \cdot \Delta Q , \quad (1.5)$$

де K_p – коефіцієнт емісії викидів забруднюючих речовин, г/ГДж;

– для **економічного ефекту** E_{III} : зменшення фінансових витрат за споживання теплової енергії протягом розрахункового періоду – ΔC_{hc} (грн.) або за споживання палива – ΔC_{fuel} (грн.):

$$\Delta C_{\text{hc}} = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot c_{\text{hc}} \cdot \Delta Q , \quad (1.6)$$

де c_{hc} – вартість одиниці теплової енергії за встановленими тарифами, грн/Гкал;

$$\Delta C_{\text{fuel}} = 10^{-3} \cdot c_{\text{fuel}} \cdot \Delta V_{\text{fuel}} , \quad (1.7)$$

де c_{fuel} – вартість палива за встановленими тарифами, грн./т або тис. грн. м³ [1].

1.3 Стан декарбонізації та розвитку сонячної енергетики у Вінницькій області

Україна взяла на себе значне зобов'язання щодо боротьби зі зміною клімату, пообіцявши скоротити свої викиди парникових газів (ПГ) на 65% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року, з довгостроковою метою досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року [38]. Ця амбіційна ціль, викладена в оновленому Національно визначеному внеску (NDC) країни до Паризької угоди в 2021 році, встановлює чітку мету. напрямок енергетичного переходу країни. Це вимагає фундаментальної відмови від традиційних джерел викопного палива, які історично домінували в енергетичному ландшафті України. Економіка країни характеризується високою вуглецевою інтенсивністю із значними викидами, що походять із таких секторів, як виробництво енергії, транспортування та промислові процеси [39]. Ця історична залежність підкреслює значний масштаб виклику декарбонізації та нагальну потребу використовувати більш чисті альтернативи енергії для пом'якшення впливу на навколишнє середовище та узгодження з глобальними кліматичними цілями. Крім того, прагнення України до більш тісної інтеграції з Європейським Союзом (ЄС) та її відданість міжнародним кліматичним угодам означають, що її кліматична політика все більше узгоджується з *acquis Communautaire* ЄС, включаючи Європейську зелену угоду [59]. Це узгодження забезпечує як політичний, так і економічний поштовх для зусиль з декарбонізації по всій країні, поширюючись на такі регіони, як Вінниця. Сонячна енергетика також зростає в Україні. У 2018 році нові встановлені фотоелектричні системи досягли 211,0 МВт порівняно з 2017 роком, згідно з даними Global Market Outlook (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 Збільшення потужностей на 10 провідних європейських ринках сонячної енергетики у 2017 та 2022 роках

2018		2022	
Країна	Збільшення потужностей (МВт)	Країна	Збільшення потужностей (МВт)
Турція	2,588	Німеччина	3,992
Німеччина	1,760	Франція	3,240
Велика Британія	954	Турція	2,250
Франція	873	Нідерланди	1,912
Нідерланди	770	Іспанія	1,849
Італія	409	Італія	1,824
Бельгія	285	Україна	751 (4%)
Швейцарія	260	Велика Британія	587
Україна	211 (2%)	Польща	551
Австрія	170	Греція	543

Дивлячись на Таблицю 1.2 нижче, можна сказати, що Україна має великий потенціал у сонячних енергетичних системах, як наземних, так і дахових.

Таблиця 1.2. Потенціал сонячної енергетики в Україні, ГВт.

	2030	2050
Для наземних електростанцій	16	90
Для електростанцій, що встановлюються на даху	5	36

Вінницька область, розташована в центральній частині України [40], займає важливе місце в енергетичному контексті країни. Його центральне географічне розташування може бути вигідним для розвитку стійкої та взаємопов'язаної

національної енергетичної мережі, особливо в умовах, коли децентралізовані відновлювані джерела енергії набувають популярності. Регіон має різноманітну промислову базу, ключові сектори якої включають харчову промисловість (на яку припадає суттєва частка промислового виробництва 57,5%), електроенергетику (15,6%, включаючи Ладизинську ТЕС), машинобудування та металообробку (9,4%), хімічну та нафтохімічну промисловість (5,7%) [41]. Ці галузі є основними споживачами енергії та мають значні можливості для впровадження цілеспрямованих заходів з декарбонізації для зменшення навколишнього середовища. слід. Слід зазначити, що Вінниця має доступ до різноманітних місцевих енергетичних ресурсів, включаючи річкову воду, вітер, енергію відходів, геотермальний потенціал і сонячне випромінювання [42]. Така наявність різноманітних відновлюваних ресурсів переконливо свідчить про потенціал для розвитку більш стійкої енергетичної системи з місцевих джерел у регіоні, підвищення його енергетичної незалежності та екологічної стійкості [60].

Розуміння ширшого енергетичного контексту України є вирішальним для аналізу ситуації у Вінницькій області. В Україні за останні роки спостерігалось значне зниження загального споживання енергії. Загальне споживання енергії на душу населення зменшилося з 4,9 тонни нафтового еквіваленту (тне) у 1990 році до 2,1 тне у 2021 році та впало на 19% у 2022 році до 1,7 тне, що є значно нижчим за середній показник для Європейського Союзу [38]. Подібним чином споживання електроенергії в Україні різко скоротилося на 32% у 2022 році, головним чином через значні пошкодження енергетичної інфраструктури та широкомасштабні економічні зриви, спричинені російським вторгненням [38]. Загальне споживання енергії в Україні на душу населення скоротилося з 4,9 тне у 1990 році до 2,9 тне у 2010 році та 2,1 тне у 2021 році. У 2022 році воно навіть знизилося на 19% до 1,7 тне, що на 55% нижче за середній показник по ЄС (Рисунок 1.5).

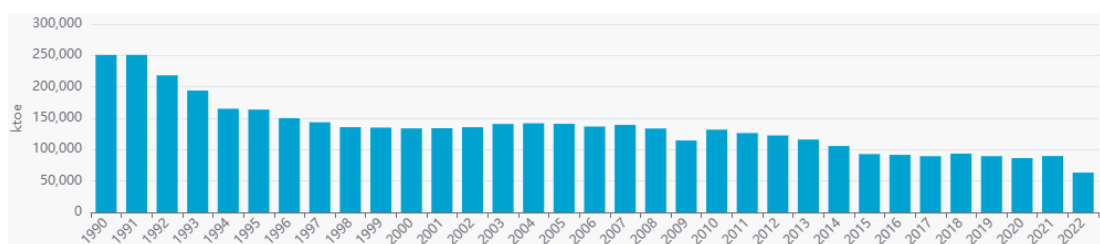


Рис 1.5 Інтерактивна діаграма загального споживання енергії в Україні

У 2022 році розподіл загального кінцевого енергоспоживання між різними секторами в Україні показав, що житловий сектор становив найбільшу частку – 34,7%, за ним йшла промисловість – 21,3%, комерційні та комунальні послуги – 11,3%, і транспорт – менший – 3,2% [43]. Хоча конкретні дані щодо галузевого енергоспоживання у Вінницькій області прямо не надано в доступній інформації, доцільно зробити висновок про подібну схему розподілу з житловим сектором. та промислова діяльність, яка, ймовірно, представляє первинні енергоспоживаючі сектори в регіоні. Дослідження первинних джерел енергії на національному рівні показує, що природний газ становив значну частину загального обсягу енергопостачання України – 25,1% у 2022 році. Найбільшу частку займала атомна енергетика – 26,5%, за нею – вугілля – 21,7% і нафта – 18,6% [44]. Відновлювані джерела енергії, включаючи гідроенергію та біопаливо, становили менший відсоток у загальному енергетичному балансі. Цей національний енергетичний баланс підкреслює значну залежність від невідновлюваних ресурсів, підкреслюючи необхідність переходу до більш чистих альтернатив для досягнення цілей декарбонізації [61].

Зосереджуючись конкретно на Вінницькій області, дані за 2020 рік дають більш детальну картину моделей споживання енергії до повного впливу недавнього конфлікту. У цьому році підприємствами, установами та населенням області спожито 3,0 млн. тонн первинних видів палива і продуктів в умовному вираженні. Це включало значні 1236,0 мільйонів кубометрів природного газу та 1023,4 тисячі тонн вугілля, що вказує на значну залежність від цих викопних видів палива. Регіон також спожив 278,7 тисяч тонн газойлю, 96,1 тисячі тонн бензину та 59,1 тисячі тонн пропану та зрідженого бутану, що відображає енергетичні потреби транспорт

та інші галузі. Крім того, у 2020 році у Вінницькій області використано 1804,3 тис. Гкал тепла та 2302,9 млн кВт·год електроенергії.⁸ Порівнюючи ці цифри з попереднім 2019 роком, можна виявити цікаві тенденції використання палива у Вінниці. На 13,5% зменшилось споживання кам'яного вугілля, на 4,6% – бензину автомобільного, на 7,6% – природного газу. Примітно, що споживання газу значно скоротилося на 19,5%, тоді як споживання пропану та зрідженого бутану зросло на 13,1% за цей період. Ці зрушення можуть свідчити про ранню стадію диверсифікації енергетики або реакцію на зміну ринкових умов у регіоні. Що стосується споживання електроенергії та тепла, у Вінницькій області споживання електроенергії у 2020 році зменшилося на 9,3% порівняно з 2019 роком, тоді як споживання тепла незначно зросло на 1,2%. Зменшення попиту на електроенергію можна пояснити такими факторами, як посилення заходів з енергоефективності, зміни промислової діяльності або ширший економічний вплив у регіоні ще до основного впливу повномасштабного вторгнення.

Дані за 2020 рік чітко вказують на те, що споживання енергії у Вінницькій області значною мірою залежало від викопного палива, причому значні обсяги природного газу та вугілля використовувалися в різних секторах [45]. Ця значна залежність від вуглецевих джерел сприяє викидам парникових газів, підкреслюючи нагальну необхідність переходу до більш чистих і стійких альтернатив енергії для узгодження з національними та глобальними кліматичними цілями. Наявність Ладизинської ТЕС у Вінницькій області, ключового компонента її електроенергетичної галузі, ймовірно, сприяє споживанню викопного палива, ще більше підкреслюючи важливість переходу до виробництва енергії з відновлюваних джерел для декарбонізації енергетичного сектора регіону. Крім того, у Вінницькій області є поклади бурого вугілля, які, хоча й потенційно придатні для використання в енергетичних цілях [41], є ще одним джерелом викопного палива, яке слід розглядати в контексті декарбонізації. Відмова від прямого спалювання такого палива має важливе значення для зменшення загального вуглецевого сліду в регіоні та сприяння більш стійкій енергетичній системі.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну в лютому 2022 року мало глибокий і руйнівний вплив на енергетичний сектор країни, включно з Вінницькою областю. На національному рівні вторгнення призвело до значного скорочення споживання природного газу (на 28,7% у 2022 році порівняно з 2021 роком) та споживання електроенергії (на 30-35%) через масштабні пошкодження критичної інфраструктури та загальний економічний спад. Під час початкової фази агресії приблизно 50% наявних в Україні генеруючих потужностей і трансформаторних підстанцій системи передачі були тимчасово втрачені через пошкодження та окупації, що серйозно порушило постачання як електроенергії, так і газу по всій країні [46]. Вінницька область також зазнала пошкодження своєї енергетичної інфраструктури в результаті ворожих атак [47], що вказує на те, що вона не була захищена від ширшого впливу конфлікту на енергетичну систему України. У період з листопада 2022 року по лютий 2023 року електропостачання було обмежено в середньому для 3,8 мільйонів споживачів по всій Україні, при цьому максимальна кількість споживачів, які постраждали від обстрілів під час системної аварії в енергосистемі, сягнула 13,5 мільйонів. Цей широкомасштабний збій, ймовірно, також торкнувся жителів і підприємств Вінницької області, підкреслюючи вразливість централізованої енергетичної інфраструктури до зовнішніх загроз. Енергосистема України зазнала значних втрат у генеруючих потужностях через окупацію та атаки, за оцінками, близько 21 ГВт у 2022-2023 роках, з подальшими втратами понад 9 ГВт теплової та гідрогенерації у 2024 році [48]. Ці втрати підкреслюють нагальну потребу в альтернативних та більш стійких джерелах енергії, таких як децентралізовані системи відновлюваної енергії, для зміцнення енергетичної безпеки країни. Навіть нещодавно у грудні 2024 року повідомлялося, що енергетична інфраструктура Вінницької області була пошкоджена ворожими атаками, що потребувало скоординованих зусиль енергетиків для відновлення електропостачання всіх споживачів [47]. Це підкреслює постійну вразливість енергетичної інфраструктури регіону. Протягом 2024 року в Україні спостерігалися сезонні сезонні періоди високого споживання електроенергії, а енергосистема продовжує відновлюватися після численних масованих атак російських військових.

Це призвело до впровадження аварійних відключень електроенергії та обмежувальних заходів як для побутових, так і для промислових споживачів у різних регіонах, у тому числі у Вінниці [49]. Постійний вплив геополітичних подій підкреслює критичну потребу у переході до більш стійкої та стійкої енергетичної системи у Вінницькій області, де відновлювані джерела енергії відіграють ключову роль.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють ключову роль у забезпеченні декарбонізації економіки та усіх сфер діяльності людини. Особливу увагу заслуговує фотовольтаїка, або сонячна енергетика. Сонце, як джерело сонячної енергії, є основою існування та вважається довгостроковим, невичерпним, безпечним та екологічно чистим джерелом енергії для людства. Сонячна енергія переважно поширюється у вигляді тепла (інфрачервоний спектр) та світла (видимий діапазон хвиль). Сонячна енергія генерується в результаті ядерного синтезу водню (дейтерію і тритію), в ході якого утворюються важкі ядра гелію, що супроводжується вивільненням значної енергії — 7 MeV на нуклон, через втрату маси. Потік сонячної енергії становить $3,9 \cdot 10^{26}$ Вт, з яких близько $1,7 \cdot 10^{17}$ Вт досягає Землі. Щодня Сонце випромінює на Землю 960 мільярдів кВт·год вільної енергії. Теоретично, цієї кількості енергії достатньо, щоб забезпечити енергетичні потреби людства на тривалий період. Декарбонізація передбачає обмеження видобутку вуглецевих матеріалів і природних ресурсів, а також скорочення викидів парникових газів, включно з вуглецем і сажею. Альтернативою є повне розгортання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій. Основою фотовольтаїки є монокристалічний кремній, також використовуються полікристалічний та аморфний кремній. Також розглядаються нові напівпровідникові композиції, які дешевші, проте складні у промисловому впровадженні. Зроблено висновок, що повоєнна економіка України має відновлюватися, використовуючи екологічні технології декарбонізації, а також комплексно розвивати індивідуальні сонячні електростанції та інші ВДЕ [1].

Сонячна енергія значною мірою визначає та регулює клімат і погоду, є критичним компонентом фотосинтезу і, відповідно, фундаментальним для

екологічного життя на планеті. Повний спектр довжин хвиль сонячного випромінювання (99,9%) перебуває переважно в діапазоні 150-4000 нм. Ультрафіолетова складова, особливо максимуми в діапазоні 200-300 нм, значною мірою поглинається озоном на висоті 15-30 км (максимум 20-25 км) над поверхнею Землі. Водночас, людство має у своєму арсеналі Сонце, як невичерпне джерело енергії та як природний матеріал для реалізації фотоелектричних технологій. По-перше, йдеться про кремній (силіцій), як унікальний напівпровідниковий матеріал, який міститься приблизно у 30% сполук земної кори (кварц, пісок, кремнезем, силікати та багато інших кремнійвмісних сполук). Крім того, на базі сучасних нанотехнологій і новітніх розробок та матеріалів, зокрема, вирощування матеріалів на основі сполук не менш унікального хімічного елементу вуглецю (карбону), як-от графен, карбіни, фулерени, нанотрубки, нанокільця та інші модифікації, людство матиме змогу генерувати чисту енергію. Є сподівання, що згадані вище труднощі, пов'язані з цим, невдовзі будуть вирішені.

Згідно з кліматичним поділом, територія України розмежовується на чотири зони, кожна з яких характеризується певним рівнем сонячної радіації, що визначає її енергетичний потенціал: Південний Крим та Одеська область – зона I, де щорічний показник сягає 1350 кВт/м²; Південний схід України, охоплений військовими діями та окупований агресором – зона II, з радіацією 1250 кВт/м²; Північні та центральні регіони – зона IV, з показником 1050 кВт/м² на рік; та, зрештою, Південний захід України, а саме Карпати та Закарпаття – зона III, де щорічна сонячна радіація складає 1150 кВт/м². Варто також відзначити, що південна частина Вінницької області має ознаки двох зон – II та III. Розподіл сонячної радіації в розрізі місяців представлено на рис. 1.5. Густина позаземного сонячного випромінювання наближається до 1,35 кВт/м², а пікова інтенсивність сонячного світла біля земної поверхні становить близько 1 кВт/м², але така ситуація спостерігається лише протягом кількох літніх годин. У середньому, інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі знаходиться в межах 200-250 Вт/м². Сукупне річне сонячне випромінювання на території України оцінюється у 7,2 x 10¹⁴ кВт-год, що еквівалентно 88,4 мільярдам тонн умовного палива. Для Вінницької області

ця величина дорівнює 37 109 тоннам умовного палива: інфрачервоне випромінювання ~46%, ультрафіолетове ~9%, видиме ~45%, та незначна доля гамма-випромінювання (~0,01-1 нм), рентгенівського випромінювання (~1-100 нм), а також «довгі хвилі» радіо- та космічного діапазону в сантиметрах, дециметрах, метрах і кілометрах.

У той же час, за даними Національного агентства України з енергоефективності та енергозбереження, частка відновлюваних джерел енергії в загальному енергетичному балансі України продемонструвала зростання вдвічі за останні 10-15 років, і наразі становить приблизно 10-13% в різних секторах економіки. Паралельно з цим, обсяг електроенергії, виробленої сонячними електростанціями (СЕС), зріс на порядок, перевищивши 1 ТВт-год , а загальна кількість встановлених СЕС, включаючи ті, що функціонують за «зеленим» тарифом, впровадженим з 2010 року, збільшилась з сотень до тисяч об'єктів. У таблиці 1.3 наведено ключові компанії сонячної енергетики у Вінницькій області, їхню основну діяльність та їхній орієнтовний внесок у встановлені сонячні потужності на основі наявної інформації.

Таблиця 1.3 Ключові компанії сонячної енергетики у Вінницькій області

Назва компанії	Основні види діяльності	Очікувана встановлена потужність у Вінниці (МВт)
Ukrteplo	Розробка, експлуатація	4.2
Rengy Development	Розробка	55
KNESS Group	Розробка, Будівництво, Виробництво, Експлуатація	~93.6
Avenston	Експлуатація	5.776

2 АНАЛІЗ ПЛАНАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ КРЕМНІЮ ДЛЯ СУЧАСНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Основи планарної технології у виробництві кремнію

Зростаючий світовий попит на сталу енергетику позиціонував сонячну енергетику як критичний компонент майбутнього енергетичного ландшафту. Сучасні сонячні панелі залежать від високоякісного кремнію для ефективного перетворення сонячного світла в електроенергію, а постійне прагнення до підвищення ефективності та зниження виробничих витрат стимулює інновації в процесах виробництва кремнію. Серед цих процесів планарна технологія, спочатку розроблена для напівпровідникової промисловості, стала фундаментальним підходом для досягнення суворих стандартів якості, необхідних для кремнію в передових сонячних застосуваннях.

Планарна технологія, наріжний камінь сучасного виробництва напівпровідників, була новаторською розробкою, розробленою у Fairchild Semiconductor у 1959 році фізиком Жаном Ерні. Цей процес широко визнаний одним із найважливіших досягнень в історії напівпровідникової технології [50]. Фундаментальною концепцією планарної технології є представлення електронної схеми у двовимірній площині, що дозволяє застосовувати фотолітографічні методи, подібні до використання плівкових негативів, для вибіркової обробки кремнієвої підкладки. Цей підхід став основним методом побудови окремих компонентів транзистора та подальшого їх з'єднання для формування інтегральних схем. Крім того, планарний процес є найпоширенішим методом створення р-п переходів, основних будівельних блоків напівпровідникових приладів. Розвиток планарної технології не був ізольованою подією, а радше рішенням існуючих проблем у

напівпровідниковій промисловості. Ранні конструкції транзисторів, такі як меза-транзистор, страждали від проблем з надійністю через оголені р-п переходи. Ерні прийшов до висновку захистити ці чутливі області шаром діоксиду кремнію, концепція, яка виявилася революційною. Цей захист не лише покращив продуктивність та термін служби транзисторів, але й проклав шлях для масового виробництва та складних взаємозв'язків, необхідних для інтегральних схем. Успіх планарної технології у вирішенні цих критичних проблем у виробництві напівпровідників показав її потенційну застосовність та переваги для інших кремнієвих технологій, включаючи виробництво високоякісного кремнію для сонячних панелей.

Поверхнева пасивація: критичним принципом планарної технології є поверхнева пасивація кремнію за допомогою шару діоксиду кремнію (SiO_2). Цей шар діє як чудовий електричний ізолятор, ефективно захищаючи кремнієвий матеріал, що лежить в основі, та важливі р-п переходи від забруднення, вологи та коротких замикань. Явище пасивуючого ефекту діоксиду кремнію вперше спостерігали в 1955 році Карл Фрош та Лінкольн Дерік у Bell Labs, які зазначили, що випадковий шар SiO_2 , вирощений на кремнієвій пластині, проявляє захисні властивості. Жан Ерні, усвідомлюючи глибокі наслідки цього відкриття, використав цей пасивуючий ефект, коли в 1959 році запатентував планарний процес, запропонувавши виготовлення транзисторів, які були б за своєю суттю захищені шаром SiO_2 . Ця самопасивація кремнію його рідним оксидом є значною перевагою, оскільки вона безпосередньо сприяє підвищенню надійності та стабільності напівпровідникових приладів, запобігаючи деградації електричних характеристик поверхні кремнію та р-п переходів. Застосування подібних методів пасивації поверхні також має вирішальне значення у виробництві сонячних елементів для захисту шару кремнієвого поглинача та р-п переходу від факторів навколишнього середовища та домішок, тим самим покращуючи довгострокову продуктивність та ефективність сонячних панелей.

Термічне окислення: Шар діоксиду кремнію в планарному процесі зазвичай формується за допомогою термічного окислення, методу, який включає вплив на

кремнієву пластину окислювальної атмосфери (часто містить вологу) за високих температур [50]. Цей контрольований процес дозволяє точно вирощувати однорідний та високоякісний шар діоксиду кремнію з певною товщиною та властивостями. Термічно вирощений оксид не тільки забезпечує чудову електричну ізоляцію, але й демонструє вирішальну властивість діяти як селективна маска проти певних домішок легуючих речовин під час наступних етапів дифузії [51]. Здатність точно контролювати зростання цього ізоляційного та маскуючого шару є фундаментальною для виготовлення складних напівпровідникових структур з певними електричними характеристиками. У контексті виробництва сонячних елементів термічне окислення може бути аналогічно використано для створення високоякісних ізоляційних шарів у передових конструкціях елементів, таких як ті, що включають тунельні оксидні шари, або як маскувальний шар для досягнення селективного легування кремнієвої пластини.

Фотолітографія: Планарна технологія використовує фотолітографію, техніку, аналогічну традиційній обробці фотоплівки, для перенесення складних схем на кремнієву пластину з високою точністю. У цьому процесі світлочутливий та стійкий до травлення матеріал, який називається фоторезист, наноситься у вигляді тонкої плівки на шар діоксиду кремнію. Потім використовується маска, зазвичай фотографічна пластина, що містить бажаний схемний малюнок, для вибіркового опромінення фоторезисту ультрафіолетовим світлом. Опромінювання викликає хімічні зміни у фоторезисті, роблячи його більш або менш розчинним у розчині проявника, залежно від того, використовується позитивний чи негативний резист. Після проявлення візерунчастий шар фоторезисту захищає нижній діоксид кремнію в певних областях, залишаючи інші області відкритими. Цей візерунчастий шар оксиду потім служить маскою для наступних етапів обробки, таких як травлення або іонна імплантація. Роберт Нойс, розвиваючи планарний процес Херні, усвідомив потенціал використання шару діоксиду кремнію як ізолятора, що дозволяє додавати металеві з'єднання на верхню поверхню пластини, створюючи тим самим першу практичну монолітну інтегральну схему. Хоча сонячні елементи зазвичай мають більші розміри елементів порівняно з інтегральними схемами, фундаментальні

принципи фотолітографії, що забезпечують високу точність і можливість одночасної обробки цілих пластин, можуть бути адаптовані для різних етапів виробництва сонячних елементів, включаючи визначення легуючих областей, створення дрібних металевих контактних сіток або нанесення спеціалізованих покриттів з високою точністю та однорідністю.

Травлення: Після фотолітографії оголений шар діоксиду кремнію, незахищений візерунчастим фоторезистом, вибірково видаляється за допомогою процесів травлення. Цей крок показує нижню кремнієву підкладку в точному малюнку, визначеному маскою. Травлення може бути досягнуто за допомогою вологих хімічних травильних агентів, таких як плавикова кислота (HF) для діоксиду кремнію, або методів сухого плазмового травлення, залежно від конкретних вимог процесу. Здатність вибірково видаляти шар діоксиду кремнію з високою точністю до малюнка маски має вирішальне значення для визначення областей на кремнієвій пластині, де відбуватимуться наступні етапи обробки, такі як введення легуючих домішок або осадження металевих контактів. У контексті виготовлення сонячних елементів методи контрольованого травлення використовуються для різних цілей. До них належать видалення пошкоджених шарів кремнію після процесу нарізання пластини, створення текстурованих поверхонь на кремнієвій пластині для покращення захоплення світла (хоча це призводить до неплоскої поверхні) та точне визначення областей, де відбуватиметься легування для формування р-п переходу або де будуть осаджені металеві контакти для збору генерованого струму.

Дифузія: Планарний процес дозволяє контрольоване введення легуючих домішок, таких як бор (легуюча домішка р-типу) та фосфор (легуюча домішка п-типу), у кремнієву підкладку через вікна, витравлені в шарі діоксиду кремнію. Цей процес легування зазвичай проводиться за високих температур, що дозволяє атомам легуючої домішки дифундувати в кремнієву решітку на контрольовану глибину та концентрацію. Тип та концентрація атомів легуючої домішки змінюють електропровідність кремнію в структурованих областях, що призводить до утворення напівпровідникових областей р-типу та п-типу та, як наслідок, створення р-п переходів, які є важливими для роботи як транзисторів, так і сонячних

елементів. Значною перевагою планарного процесу була його здатність досягати високого ступеня точності в контролі глибини та концентрації цих легуючих домішок, що має вирішальне значення для оптимізації продуктивності напівпровідникових приладів [51]. У виробництві сонячних елементів точний контроль над рівнями легування та глибиною переходу, що забезпечується методами, отриманими з планарного процесу, має вирішальне значення для максимізації ефективності фотоелектричного перетворення енергії.

Металізація: Останній ключовий принцип планарного процесу включає осадження металевих шарів, часто алюмінію, по всій поверхні кремнієвої пластини, включаючи шар діоксиду кремнію. Цей металевий шар потім вибірково структурується за допомогою фотолітографії та травлення для створення необхідних електричних з'єднань між різними компонентами, виготовленими на пластині, такими як транзистори, конденсатори та резистори, без необхідності ручного з'єднання. Концепція інтегральної схеми Роберта Нойса вирішально включала цей металевий шар для з'єднання компонентів, створених за допомогою планарного процесу Херні. У контексті виробництва сонячних елементів, хоча конкретні візерунки та матеріали, що використовуються для металізації, відрізняються, основні принципи контрольованого осадження та структурування металевих шарів є безпосередньо застосовними. Надійні та ефективні металеві контакти є важливими для збору електричного струму, що генерується всередині сонячного елемента, та для з'єднання окремих сонячних елементів разом для формування функціональних сонячних панелей.

2.2 Процес виробництва кремнію для сонячних панелей

Від сировини (кварцу) до кремнію металургійного класу (MG-Si): Шлях кремнію в сонячних панелях починається з кварцу (SiO_2), поширеного мінералу, який широко зустрічається в піщаних та гірських породах по всій Землі. Для вилучення кремнію з цієї сировини використовується високотемпературний процес

плавлення. Зазвичай це включає нагрівання кварцового піску або кварцу у великих промислових печах до температур, що досягають приблизно 2000°C (3600°F) або вище. У процесі використовується карботермічна реакція відновлення, де вуглецеві матеріали, такі як кокс та деревна стружка, використовуються для видалення кисню з діоксиду кремнію. Це початкове відновлення дає кремній металургійного класу (MG-Si), рівень чистоти якого становить приблизно 98-99% [52]. Хоча цієї чистоти достатньо для деяких промислових застосувань, її недостатньо для суворих вимог сонячних елементів, які вимагають набагато вищого рівня чистоти для досягнення ефективного перетворення енергії. Енергоємний характер цього початкового процесу екстракції підкреслює важливість оптимізації подальших етапів очищення та виготовлення пластин для мінімізації загального енергетичного сліду та вартості виробництва сонячних панелей.

Очищення до кремнію сонячного класу (SoG-Si): Щоб задовольнити високі вимоги до продуктивності сонячних елементів, кремній металургійного класу (MG-Si) повинен пройти подальше рафінування для досягнення рівня чистоти 99,9999% (6N) або вище. Процес Сіменса є найпоширенішим методом для цього важливого етапу очищення [53]. Цей процес включає перетворення MG-Si на газоподібний трихлорсилан (SiHCl_3) шляхом реакції з хлористим воднем. Леткий трихлорсилан потім очищається фракційною дистиляцією, що ефективно відокремлює його від різних домішок. На заключному етапі процесу Сіменса очищений газоподібний трихлорсилан вводиться у високотемпературний реактор (близько 1150°C або 2102°F), що містить тонкі нитки чистого кремнію. Трихлорсилан розкладається, осаджуючи високочистий полікремній на нагріті нитки в процесі, відомому як хімічне осадження з парової фази (CVD), що призводить до росту полікремнієвих стрижнів. Альтернативним методом очищення є технологія реактора з псевдозрідженим шаром (FBR) [54]. FBR передбачає реакцію кремнійвмісних газів, таких як моносилан (SiH_4) або трихлорсилан (SiHCl_3), з невеликими частинками кремнієвого зародка, суспендованими в реакторі. Атоми кремнію з розкладаючогося газу осідають на частинках зародка, змушуючи їх перетворюватися на гранульований полікремній. Хоча технологія FBR загалом пропонує нижче

енергоспоживання порівняно з процесом Siemens, вона зіткнулася з труднощами у досягненні широкого промислового впровадження. Інший метод, покращений кремній металургійного класу (UMG), використовує фізичні методи очищення, такі як вакуумне плавлення та спрямоване затвердіння, для підвищення чистоти MG-Si. Однак цей метод намагається постійно досягати високих рівнів чистоти, необхідних для сонячних елементів, і використовується рідше. Очищення кремнію до рівня сонячного класу є важливим та енергоємним кроком, який суттєво впливає на вартість та вплив на навколишнє середовище виробництва сонячних панелей. Поширеність процесу Сіменса підкреслює його ефективність у виробництві необхідного кремнію високої чистоти, тоді як поточні дослідницькі та розробницькі зусилля продовжують вивчати альтернативні методи, такі як FBR, для підвищення ефективності та зниження витрат.

Формування злитків: Після етапу очищення полікремній сонячного класу знову плавиться в тиглі, часто виготовленому з високочистого кварцу, за підвищених температур, зазвичай близько 1420°C (2600°F) [52]. Метод формування злитків визначає кристалічну структуру кремнію, що, у свою чергу, впливає на ефективність отриманих сонячних елементів. Для виробництва високоефективних сонячних панелей монокристалічні кремнієві злитки переважно вирощуються за методом Чохральського (CZ) [53]. У цьому процесі невелика, високочиста монокристалічна зародка кремнію зі специфічною кристалографічною орієнтацією обережно занурюється в розплавлений кремній. Потім зародок повільно витягується вгору та одночасно обертається. Коли зародок витягується, розплавлений кремній твердне вздовж своєї кристалічної решітки, що призводить до зростання великого циліндричного монокристалічного злитка, який часто називають були. Для досягнення бажаних електричних властивостей сонячних елементів до розплавленого кремнію в невеликих кількостях під час процесу плавлення додають легуючі елементи, такі як бор для створення кремнію р-типу або фосфор для створення кремнію n-типу. Для виробництва менш дорогих сонячних панелей полікристалічні кремнієві злитки формують за допомогою спрямованого затвердіння. У цьому методі розплавлений кремній заливають у форму, часто

квадратної або прямокутної форми, і дають йому охолонути та затвердіти контрольованим чином, в результаті чого утворюється злиток, що складається з багатьох менших кристалів кремнію. Метод Чохральського особливо важливий, оскільки він дозволяє вирощувати високоякісний монокристалічний кремній, який зазвичай демонструє вищу ефективність у сонячних елементах порівняно з полікристалічним кремнієм завдяки своїй однорідній кристалічній структурі.

Нарізання, текстурування та очищення пластин: Монокристалічні або полікристалічні кремнієві злитки потім ретельно нарізаються на тонкі пластини, зазвичай товщиною від 160 до 240 мікрон, за допомогою прецизійних дротяних пилок, покритих алмазними частинками. Цей процес нарізання ретельно контролюється, щоб мінімізувати втрати кремнієвого матеріалу, відомі як втрати на пропили. Після нарізання пластини проходять ретельне очищення для видалення будь-яких пошкоджень поверхні, слідів від розпилювання та забруднень, які могли потрапити під час нарізання. Для монокристалічних кремнієвих пластин вирішальним кроком для покращення поглинання світла є текстурування поверхні. Цей процес зазвичай включає травлення передньої поверхні пластини лужними розчинами для створення щільного масиву мікроскопічних пірамід. Ці мікропіраміди зменшують відбиття падаючого сонячного світла, що призводить до захоплення та поглинання світла кремнієвим матеріалом, тим самим значно підвищуючи ефективність сонячного елемента. Перехід від старих методів дротяного пиляння на основі суспензії до сучасних алмазних дротяних пилок також вплинув на текстуру поверхні пластин, що вимагало коригування в наступних процесах текстурування. Тенденція до використання тонших кремнієвих пластин у виробництві сонячних елементів, зумовлена прагненням зменшити витрати на матеріали, створює труднощі з обробкою крихких пластин і вимагає використання передових методів текстурування поверхні для компенсації зменшеної товщини та підтримки високого рівня поглинання світла.

Легування та антиблікове покриття: Оброблені кремнієві пластини потім проходять вирішальний етап, який називається легуванням, де специфічні домішки навмисно вводяться в кремнієву решітку, щоб змінити її електричні властивості та

створити р-п перехід. Зазвичай бор використовується для легування кремнію для створення шару р-типу (позитивний носій заряду), а фосфор дифундує в пластину, утворюючи тонкий шар n-типу (негативний носій заряду), що призводить до утворення р-п переходу. Цей перехід є фундаментальним для фотоелектричного ефекту, оскільки він створює електричне поле, яке розділяє електрон-діркові пари, що генеруються сонячним світлом. Дифузія фосфору, яку часто проводять за високих температур у трубчастих печах, є традиційним та економічно вигідним методом створення цього переходу. Нарешті, для подальшого підвищення ефективності сонячного елемента на поверхню кремнієвої пластини наносять антиблікове покриття (ARC). Це покриття, часто виготовлене з таких матеріалів, як нітрид кремнію або діоксид титану, мінімізує відбиття сонячного світла від поверхні пластини, дозволяючи кремнію поглинати більшу кількість фотонів та перетворювати їх на електричну енергію. Було показано, що антивідблискові плівки значно покращують ефективність кремнієвих сонячних елементів [52].

Планарна технологія, що сягає корінням у виробництво напівпровідникових пристроїв, пропонує значні переваги для виробництва сонячних панелей, зокрема, у досягненні покращеного контролю над формуванням переходів та геометрією пристроїв [55]. Планарний процес дозволяє точно маніпулювати поперечним протяжністю та глибиною легованих областей у кремнієвій пластині за допомогою оксидного маскування та фотолітографії. Вибірково травлячи отвори в шарі діоксиду кремнію, виробники можуть точно визначити області, куди будуть введені легуючі домішки. Цей рівень контролю має вирішальне значення для створення чітко визначених р-п переходів зі специфічними електричними характеристиками, необхідними для ефективного розділення носіїв заряду в сонячних елементах. Хоча загальна структура сонячного елемента відносно простіша, ніж у інтегральній схемі, точний контроль, що забезпечується планарною технологією, може бути ефективно використаний для оптимізації критичного р-п переходу, що призводить до покращення продуктивності з точки зору вихідної напруги та струму. Можливість налаштовувати властивості переходу, такі як його глибина та

концентрація легуючих домішок, дозволяє створювати сонячні елементи, які ефективніше перетворюють сонячне світло на електрику.

Ключовою перевагою використання планарних методів виробництва кремнію для сонячних панелей є утворення високоякісного шару діоксиду кремнію під час процесу. Цей шар природного оксиду діє як чудовий пасивуючий шар на поверхні кремнію, ефективно зменшуючи поверхневу рекомбінацію носіїв заряду [56]. Поверхнева рекомбінація відбувається, коли фотогенеровані електрони та дірки зустрічаються на поверхні кремнієвого матеріалу та анігілюють один одного, а не сприяють електричному струму. Мінімізуючи цю рекомбінацію, пасивація поверхні діоксидом кремнію призводить до вищих напруг холостого ходу та загального покращення ефективності сонячного елемента. Ефективна пасивація поверхні є критичним фактором у досягненні високоефективних сонячних елементів, оскільки вона безпосередньо зменшує втрати енергії, що відбуваються на поверхні кремнію. Планарний процес, природним чином забезпечуючи якісний пасивуючий шар діоксиду кремнію, значно сприяє підвищенню продуктивності кремнієвих сонячних елементів, що використовуються в сонячних панелях.

2.3 Метод Чохральського: вирішальний крок у вирощуванні кристалів кремнію

Метод Чохральського, також відомий як витягування кристалів, є найпоширенішим методом отримання великих, високоякісних монокристалів кремнію, які служать основою як для напівпровідникових приладів, так і для більшості високоефективних сонячних елементів. Процес починається з плавлення високочистого полікристалічного кремнію (полікремнію) у тиглі, зазвичай виготовленому з кварцу, за надзвичайно високих температур, що перевищують 1414°C . Щоб ініціювати зростання монокристала, невеликий зародковий кристал кремнію зі специфічною кристалографічною орієнтацією обережно занурюють у розплавлений кремній. Потім зародковий кристал повільно витягують вгору з

розплаву, одночасно обертаючи його, що призводить до затвердіння розплавленого кремнію на зародку та його перетворення на великий циліндричний монокристалічний злиток, відомий як були. Діаметр і довжина зростаючого кристала точно контролюються шляхом регулювання таких параметрів, як температура розплавленого кремнію, швидкість витягування зародкового кристала вгору та швидкість обертання як зародкового кристала, так і тигля. Процес Чохральського зазвичай виконується в інертній атмосфері аргону, щоб запобігти забрудненню високореактивного розплавленого кремнію [57].

Метод Чохральського має першорядне значення у виробництві високоякісного кремнію для високоефективних сонячних елементів, оскільки він дозволяє вирощувати великі монокристалічні злитки кремнію з майже ідеальною кристалічною структурою. Ця високовпорядкована кристалічна решітка є важливою для досягнення максимально можливої ефективності перетворення світла в електрику в сонячних елементах на основі кремнію. Крім того, метод Чохральського кремнію дозволяє точно контролювати включення легуючих домішок, таких як бор або фосфор, у розплав кремнію під час процесу росту кристалів. Це точне легування є критично важливим для створення р-n переходу в кремнієвій пластині, який є фундаментальним елементом, відповідальним за фотоелектричний ефект у сонячних елементах. Хоча використання кварцового тигля в методі Чохральського кремнію може вводити домішки кисню в кремнієвий злиток [58], що може мати як корисний, так і негативний вплив на продуктивність сонячних елементів, метод Чохральського кремнію залишається домінуючою технікою для виробництва переважної більшості високоефективного кремнію, що використовується в сонячних панелях, завдяки своїй здатності вирощувати великі монокристалічні злитки з контрольованими властивостями.

Під час процесу Чохральського контрольоване додавання домішок легуючого матеріалу, таких як бор або фосфор, до розплавленого кремнію дозволяє точно контролювати електричні властивості кремнію, що призводить до бажаного легування р- або n-типу для застосування в сонячних елементах. Крім того, концентрацію домішок, таких як кисень, у кремнії, вирощеному за допомогою

методу Чохральського, можна контролювати, ретельно контролюючи параметри процесу, такі як кутова швидкість тигля. Домішки кисню в кремнії можуть мати як позитивні наслідки, такі як поглинання небажаних металевих домішок та підвищення механічної міцності пластин, так і негативні наслідки, такі як утворення комплексів бор-кисень під впливом освітлення в сонячних елементах, що може погіршити продуктивність. Здатність точно контролювати ці фактори під час процесу Чохральського є важливою для адаптації кремнієвого матеріалу до конкретних вимог виготовлення високоефективних сонячних елементів, і постійні дослідження продовжують зосереджуватися на оптимізації цих параметрів.

Хоча метод Чохральського є домінуючим методом вирощування кристалів кремнію в сонячній промисловості, існують інші методи, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Метод флоат-зони (ФЗ) – це альтернативний метод, який дає кремній з винятково високою чистотою та дуже низьким вмістом кисню порівняно з кремнієм CZ. Ця висока чистота робить кремній ФЗ особливо придатним для потужних електронних пристроїв та деяких спеціалізованих застосувань сонячних елементів. Однак метод флоат-зони, як правило, дорожчий і має нижчу виробничу продуктивність порівняно з методом Чохральського, що робить CZ кращим вибором для великомасштабного, економічно ефективного виробництва кремнію для більшості застосувань сонячних елементів.

З ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НЕКРЕМНІЄВИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ ФОТОПАНЕЛЕЙ

3.1 Технології виробництва тонкоплівкових сонячних панелей без кремнію

Сонячна енергія стала критично важливим компонентом глобального переходу до джерел сталої енергії. Фотоелектричні (ФЕ) технології відіграють центральну роль у використанні сонячної енергії, перетворюючи сонячне світло безпосередньо на електроенергію. Еволюція технології сонячних панелей пройшла через кілька поколінь. Сонячні панелі першого покоління переважно базувалися на кристалічних кремнієвих пластинах, добре зарекомендуємою технології, відомій своєю ефективністю та довговічністю. Однак ці панелі часто передбачають значне використання матеріалів та енергоємні виробничі процеси. Сонячні елементи другого покоління, відомі як тонкоплівкові сонячні елементи, являють собою відхід від цієї парадигми, використовуючи один або кілька тонких шарів фотоелектричного матеріалу, нанесеного на підкладку, таку як скло, пластик або метал. Ці тонкі плівки, товщиною від нанометрів до десятків мікрометрів, використовують менше активного матеріалу порівняно з традиційними кремнієвими пластинами, що зазвичай призводить до зниження виробничих витрат та меншого екологічного сліду.

Виробництво телуриду кадмію (CdTe)

Виробництво сонячних елементів з телуриду кадмію (CdTe) включає кілька ключових методів осадження, кожен з яких має свої унікальні характеристики [62]. Сублімація з близьким розташуванням елементів (СБР) – це широко використовувана техніка, при якій матеріал CdTe сублімується та осідає на підкладку, розташовану поблизу. Цей метод є популярним завдяки своїй простоті та високій швидкості осадження, що робить його особливо придатним для масового виробництва. Висока продуктивність та простота використання, пов'язані з СБР,

мають вирішальне значення для зниження виробничих витрат, що є значною перевагою технології CdTe.

Ще одним важливим методом виробництва є осадження з парової фази (VTD). У цьому процесі CdTe спочатку сублімується в області вище за течією, а отримані гази кадмію та телуру протікають через холоднішу область нижче за течією, де вони конденсуються на підкладці, утворюючи твердий CdTe. First Solar, зокрема, використовує високошвидкісний процес осадження з парової фази як альтернативу CSS, головним чином тому, що він створює плівки з більшою однорідністю та дозволяє осадження на будь-якій конфігурації підкладки. VTD вирішує потенційне обмеження CSS, пропонуючи покращений контроль над якістю плівки та покращену сумісність з різними матеріалами підкладки.⁸ Однорідність має вирішальне значення для досягнення стабільної продуктивності модулів великої площі, а гнучкість у виборі підкладки дозволяє використовувати її в різних сферах застосування [63].

Електроосадження – це ще один метод, що використовується у виробництві CdTe, який включає осадження CdTe з електролітичного розчину на підкладку шляхом подачі електричного струму. Ця техніка, за якої полікристалічні шари товщиною кілька мікрометрів можуть бути створені у водному розчині сульфату кадмію та діоксиду телуру при відносно низьких температурах близько 90°C, пропонує потенційно низьковитратний безвакуумний спосіб виробництва. Вакуумні процеси можуть бути дорогими, тому альтернативні методи, такі як електроосадження, є привабливими для зниження витрат.

Розпилення також використовується у виготовленні сонячних елементів CdTe. Цей процес включає викидання матеріалу CdTe з мішені та осадження його у вигляді тонкої плівки на підкладку. Хімічне розпилення вважається одним з основних виробничих процесів сонячних елементів CdTe. Розпилення визнано високопродуктивним методом, що робить його придатним для покриття великих площ, що є важливим для задоволення попиту на сонячні панелі в різних застосуваннях.

Окрім цих основних методів, у виробництві сонячних елементів CdTe використовуються й інші методи. До них належать хімічне осадження з парової фази (CVD), епітаксія, трафаретний друк та методи напилення. Наприклад, метод трафаретного друку передбачає нанесення суспензій порошків кадмію та телуру на підкладку та їх спікання за високих температур для формування шарів CdTe. Аналогічно, при методі напилення водний розчин сполук, що містять кадмій та телур, напилюється на нагріту підкладку. Різноманітність методів виробництва свідчить про постійні дослідницькі та розробницькі зусилля, спрямовані на оптимізацію виробництва CdTe. Різні методи можуть пропонувати переваги в певних аспектах, таких як вартість, ефективність або використання матеріалів. Вибір методу виробництва суттєво впливає на кінцеву вартість та експлуатаційні характеристики панелей CdTe. Різні методи мають різні енергетичні вимоги, ефективність використання матеріалів та якість результуючої плівки, що впливає на загальну економіку та ефективність сонячних елементів.

Виробництво селеніду міді-індію-галію (CIGS)

Виробництво тонкопліткових сонячних елементів із селеніду міді-індію-галію (CIGS) включає низку методів осадження тонкої плівки напівпровідникового матеріалу. Спільне випаровування, також відоме як співосадження, є поширеним методом виготовлення CIGS, де мідь, індій, галій та селен одночасно випаровуються та осаджуються на підкладку, часто за підвищених температур. Цей процес може бути реалізований в одноступінчастому, двоступінчастому або тріступінчастому варіантах. Тріступінчастий процес спільного випаровування, розроблений Національною лабораторією відновлюваної енергії (NREL), продемонстрував високу ефективність, досягнувши понад 20% у лабораторних умовах. Такий рівень точності в контролі складу матеріалу під час осадження має вирішальне значення для оптимізації електронних властивостей CIGS.

Ще одним важливим методом є розпилення з подальшим селенізацією. У цій техніці тонкі металеві шари міді, індію та галію розпилюються на підкладку при кімнатній температурі або близько до неї. Згодом отримана металева плівка реагує в атмосфері селену при високій температурі для формування шару CIGS. Розпилення

багатошарового металу може забезпечити більш гладку поверхню та кращу кристалічність. Цей двоетапний процес дозволяє покращити контроль над початковим осадженням металевого шару та подальшим формуванням сполуки CIGS, що потенційно спрощує керування процесом та покращує якість плівки.

Електроосадження також використовується для осадження прекурсорів CIGS за допомогою електрохімічних методів, часто з подальшим етапом селенізації. Цей підхід, який включає осадження елементарних шаруватих структур або одночасне осадження всіх елементів (включаючи селен), пропонує економічно ефективну альтернативу вакуумним методам виробництва CIGS. Подібно до виробництва CdTe, зменшення залежності від вакуумних процесів може призвести до зниження виробничих витрат.

Друк наночастинками – це ще один метод, що досліджується для вирощування CIGS. Цей метод використовує наночастинки металу або оксиду металу як прекурсори, які зазвичай суспендують у розчині на водній основі та наносять на великі площі за допомогою методів друку. Потім плівку зневоднюють та спікають, а потім селенізують при температурі вище 400 °C. Методи друку, такі як рулонний друк, пропонують потенціал для масштабованого та низьковитратного виробництва плівок CIGS, значно знижуючи виробничі витрати та збільшуючи продуктивність. Окрім цих основних методів, для виробництва CIGS досліджуються й інші методи, такі як хімічне осадження з парової фази (CVD) та електророзпилення. Різноманітність методів виробництва CIGS відображає постійні зусилля щодо оптимізації ефективності та зниження виробничих витрат. Різні методи можуть краще підходити для конкретних застосувань або масштабів виробництва [64]. Вибір методу виробництва CIGS зрештою залежить від бажаного балансу між ефективністю, вартістю та гнучкістю для цільового застосування.

Виробництво перовскітних сонячних елементів

Виготовлення перовскітних сонячних елементів переважно спирається на різні методи на основі розчинів, відомі своїм потенціалом для низьковитратного виробництва. Нанесення покриття методом центрифугування – це стандартний метод, при якому розчин-попередник перовскіту наноситься на обертову підкладку,

в результаті чого після випаровування розчинника утворюється тонка плівка [65]. Цей метод є відносно простим та економічно ефективним, особливо для виробництва сонячних елементів малої площі, які зазвичай використовуються в дослідженнях. Нанесення покриття методом центрифугування широко використовується в дослідницьких лабораторіях завдяки своїй простоті та можливості виробляти високоякісні перовскітні плівки, що дозволяє точно контролювати товщину та морфологію плівки, що є вирішальним для досягнення високої ефективності в маломасштабних пристроях. Однак, нанесення покриття методом центрифугування зазвичай страждає від втрат матеріалу та неоднорідності на більших площах, що робить його менш ідеальним для великомасштабного промислового виробництва.

Нанесення покриття методом щільного штампування є більш масштабованою альтернативою. Цей метод безконтактного нанесення передбачає подачу точного об'єму перовскітних чорнил на рухому підкладку через ретельно розроблену матрицю. Метод можна безпосередньо застосувати до промислового рулонного виробництва, пропонуючи шлях для безперервного та високопродуктивного виробництва. Нанесення покриттів за допомогою щільного штампу – це перспективний метод великомасштабного безперервного виробництва перовскітних сонячних елементів, а його сумісність з рулонною обробкою здатна значно знизити виробничі витрати та збільшити продуктивність.

Струменевий друк – це ще один метод на основі розчинів, який досліджується для виробництва перовскітних сонячних елементів. Цей метод передбачає використання струменевих принтерів для нанесення перовскітних чорнил на підкладки, що пропонує потенціал для створення візерунчастих плівок та зменшення відходів матеріалу. Струменевий друк пропонує гнучкість у проектуванні пристроїв та може мінімізувати споживання матеріалу завдяки точному нанесенню, що дозволяє виготовляти складні архітектури пристроїв.

Хоча обробка розчином домінує, методи парофазного осадження також використовуються для формування перовскітної плівки. Ці методи, включаючи такі методи, як хімічне осадження з парової фази (CVD) та фізичне осадження з парової

фази (PVD), забезпечують альтернативний шлях до обробки розчином, потенційно пропонуючи кращий контроль над якістю плівки в деяких випадках. Парофазне осадження може призвести до отримання висококристалічних плівок з меншою кількістю дефектів, що може підвищити продуктивність пристрою.

Електроосадження – ще один потенційний метод осадження перовскіту. Подібно до свого потенціалу у виробництві CdTe та CIGS, електроосадження може запропонувати економічно ефективний та масштабований метод виробництва перовскіту [65]. Цей метод добре зарекомендував себе в інших галузях промисловості та може бути адаптований для виробництва перовскітних сонячних елементів.

Характеристики цих методів, зокрема їхній потенціал для низьковитратного виробництва, гнучкість у виборі підкладок (включаючи гнучкі підкладки) та масштабованість, роблять виробництво перовскітних сонячних елементів дуже перспективним. Різноманітність методів виробництва перовскіту, особливо методів на основі розчинів, відповідає меті низьковитратного та гнучкого виробництва сонячних елементів. Обробка в розчині зазвичай вимагає нижчих температур та менш складного обладнання порівняно з вакуумними методами, що робить її більш економічно ефективною.

Виробництво органічних сонячних елементів

Виробництво органічних сонячних елементів (ОСЕ) включає кілька основних методів нанесення органічних плівок, кожен з яких сприяє унікальним властивостям цих пристроїв. Спінінгове покриття – це поширена техніка нанесення шарів органічних напівпровідників з розчину на підкладку [66]. Вибір розчинника та додавання спеціальних добавок відіграють значну роль у впливі на морфологію отриманої плівки, що, у свою чергу, впливає на продуктивність пристрою. Спінінгове покриття – це фундаментальна техніка виготовлення ОСЕ, що дозволяє створювати тонкі та однорідні активні шари. Продуктивність ОСЕ сильно залежить від морфології активного шару, яку можна контролювати за допомогою параметрів спінінгового покриття.

Вакуумне термічне випаровування (ВТВ) – ще один важливий метод нанесення. Цей процес включає нагрівання органічних матеріалів у вакуумі, що призводить до їх випаровування та осадження безпосередньо на підкладку, розміщену на невеликій відстані від джерела. ВТВ особливо корисне для нанесення кількох шарів різних органічних матеріалів без виникнення хімічної взаємодії між ними. ВТВ дозволяє виготовляти складні багатошарові структури ОСЕ з точним контролем товщини шару, що часто потрібно для оптимізації поглинання світла та перенесення заряду.

Метод органічного паровфазного осадження (OVPD) пропонує альтернативу методу віртуального термофазного осадження (VTE), забезпечуючи кращий контроль над структурою та морфологією осадженої плівки. В OVPD органічний матеріал випаровується над підкладкою в присутності інертного газу-носія. Морфологію отриманої плівки можна налаштувати, регулюючи такі параметри, як швидкість потоку газу та температура джерела. OVPD забезпечує покращений контроль над ростом органічних плівок, що призводить до покращення продуктивності пристрою. Точний контроль над морфологією плівки має вирішальне значення для оптимізації транспортування носіїв заряду та зменшення втрат на рекомбінацію в сонячних елементах (OSC).

Технології друку також все частіше використовуються для виробництва OSC, що пропонує потенціал для виробництва великої площі та низької вартості. Ці методи включають струменевий друк, рулонний друк (що охоплює такі методи, як мікрогравірування та щілинне покриття) та трафаретний друк. Рулонний друк, зокрема, має значні перспективи для високопродуктивного виробництва на гнучких підкладках. Технології друку є ключем до реалізації низьковитратного потенціалу органічних сонячних елементів завдяки високопродуктивному виробництву. Ці методи добре підходять для осадження великої площі на гнучких підкладках, що є головною перевагою технології OSC [66].

Методи виробництва, що використовуються для органічних сонячних елементів, за своєю суттю узгоджені з їхніми ключовими перевагами: гнучкістю, легкою вагою та потенційно низьким впливом на навколишнє середовище.

Технології обробки розчинами та друку, як правило, менш енергоємні та можуть використовувати більш екологічні матеріали порівняно з традиційним виробництвом напівпровідників.

3.2 Типи тонкоплівкових фотоелектричних панелей

Телурид кадмію (CdTe)

Сонячні панелі з телуриду кадмію (CdTe) мають кілька помітних переваг. Вони демонструють високий коефіцієнт поглинання, що означає, що для поглинання значної кількості сонячного світла потрібні лише дуже тонкі шари матеріалу. Процес виробництва є відносно простим, часто використовується простіший монолітний підхід, коли всі шари послідовно наносяться на одну підкладку, що може призвести до зниження виробничих витрат [67]. Панелі CdTe також демонструють хорошу продуктивність у високотемпературних середовищах, зберігаючи вищу ефективність при підвищенні температури порівняно з кремнієвими панелями. Крім того, вони ефективні в умовах низької освітленості, здатні генерувати енергію навіть у хмарні дні або рано вранці [67]. Однією з найважливіших переваг є їхня нижча виробнича вартість порівняно з традиційними панелями на основі кремнію, що робить їх економічно привабливими для великомасштабних установок. Кадмій, ключовий компонент, є поширеним як побічний продукт видобутку інших промислових металів, таких як цинк, що призводить до більш стабільних цін порівняно з кремнієм. Процес виробництва також призводить до зниження викидів вуглекислого газу порівняно з виробництвом кремнієвих панелей, а модулі легко переробляються, що ще більше покращує їхній екологічний профіль.

Незважаючи на ці переваги, сонячні панелі CdTe також мають обмеження. Кадмій – це токсичний важкий метал, що викликає занепокоєння щодо навколишнього середовища щодо утилізації та переробки цих панелей після закінчення терміну їхнього терміну служби. Хоча модулі CdTe вважаються відносно

безпечними під час експлуатації завдяки стабільній кристалічній решітці та інкапсуляції, токсичність кадмію залишається суспільною проблемою та проблемою управління кінцевим терміном служби. Громадська думка та суворі екологічні норми можуть перешкоджати широкому впровадженню технологій, що включають токсичні матеріали. Телур, інший ключовий елемент, є рідкісним елементом, що потенційно обмежує масштабованість великомасштабного виробництва сонячних панелей CdTe, якщо не будуть відкриті нові джерела або процеси переробки значно не вдосконалені. Дефіцит телуру може обмежити довгостроковий потенціал зростання технології CdTe, оскільки обмежена доступність ключового матеріалу може призвести до вразливості ланцюга поставок та волатильності цін. Хоча ефективність CdTe значно покращилася і може зрівнятися з ефективністю багатокристалічного кремнію, вона загалом відстає від найвищих показників ефективності, досягнутих з монокристалічними кремнієвими елементами. Вища ефективність означає меншу площу, необхідну для тієї ж вихідної потужності, що має вирішальне значення для застосувань з обмеженим простором. Історично склалося так, що сонячні елементи CdTe також мали коротший термін служби порівняно з кремнієвими панелями, хоча постійні дослідження та розробки спрямовані на вирішення цієї проблеми. Крім того, найкраща ефективність елементів для CdTe протягом деякого часу стабільна, що вказує на труднощі у досягненні подальших значних покращень. Наразі панелі CdTe в основному використовуються в комунальних фотоелектричних системах, з більшими обмеженнями для застосування на дахах житлових приміщень через розмір та ефективність, що робить кремнієві модулі більш сприятливими в цих сценаріях.

Селенід міді та індію-галію (CIGS)

Тонкоплівкові фотоелектричні панелі з селеніду міді та індію-галію (CIGS) пропонують кілька переконливих переваг. Вони можуть похвалитися високою ефективністю перетворення, яку часто називають найвищою серед тонкоплівкових технологій, з лабораторними показниками, що перевищують 23%. Елементи CIGS також відомі своєю гнучкістю, що дозволяє їх наносити на різноманітні підкладки, включаючи гнучкі матеріали, що відкриває можливості для різноманітного

застосування поза традиційними жорсткими панелями. Значною перевагою CIGS є регульована ширина забороненої зони, яку можна регулювати, змінюючи співвідношення галію та індію в матеріалі. Ця властивість дозволяє проектувати тандемні сонячні елементи, де кілька шарів поглинача з різною шириною забороненої зони укладаються один на одного для захоплення ширшого спектру сонячного світла. Панелі CIGS також демонструють хорошу продуктивність в умовах розсіяного світла та при високих температурах завдяки низькому температурному коефіцієнту, що означає, що їхня ефективність менше залежить від тепла порівняно з кремнієвими панелями. Також існує потенціал для розробки двосторонніх сонячних панелей CIGS, які можуть поглинати сонячне світло як з передньої, так і з задньої поверхонь, що ще більше покращує виробництво енергії. Виробництво елементів CIGS має менший вуглекислий слід порівняно з сонячними елементами на основі кремнію, що сприяє більш екологічному виробничому процесу. Крім того, модулі CIGS можна переробляти, що дозволяє відновлювати цінні матеріали, такі як індій та срібло. На відміну від деяких інших тонкоплівкових технологій, активний матеріал у CIGS не містить шкідливих компонентів, таких як кадмій, що вирішує деякі екологічні та здоров'я проблеми. Крім того, межі зерен у матеріалі CIGS діють як власний буферний шар, який допомагає перешкоджати поверхневій рекомбінації носіїв заряду, що призводить до покращення продуктивності.

Однак технологія CIGS також стикається з певними обмеженнями. Процес виробництва вимагає використання рідкісних металів, таких як індій та галій, що потенційно може вплинути на масштабованість виробництва та сприяти вищим витратам на матеріали [68]. Залежність від цих елементів створює ризики для ланцюга поставок і може вплинути на їхню ціну та доступність. Сонячні елементи CIGS також можуть швидко деградувати за певних умов навколишнього середовища, що впливає на їхню довгострокову надійність. Стабільність та довговічність залишаються ключовими викликами для технології CIGS у реальних застосуваннях, оскільки деградація з часом знижує вихід енергії та термін служби панелей, що впливає на їхню економічну життєздатність. Хоча CIGS досяг високої

ефективності, вона загалом все ще менш ефективна, ніж звичайні кристалічні кремнієві сонячні елементи, хоча рекордні показники ефективності наближаються до кремнієвих. Досягнення покращеної продуктивності в елементах CIGS іноді може зайняти більше часу порівняно з більш зрілою кремнієвою технологією. Крім того, ефективність комерційно вироблених модулів CIGS зазвичай нижча за рекордну ефективність, досягнуту в лабораторних умовах. Виробничі процеси високопродуктивних елементів CIGS можуть бути складними та часто вимагають дорогого обладнання для вакуумного осадження, що може збільшити виробничі витрати. Нарешті, повідомлялося про деякі проблеми із зворотним контактом молибдену, який зазвичай використовується в елементах CIGS, такі як можливість блокування дірок ефектом діода Шотткі на межі розділу, що може негативно впливати на продуктивність [68].

Перовскітні сонячні елементи

Перовскітні сонячні елементи стали дуже перспективною технологією з потенціалом дуже високої ефективності, яка може конкурувати та навіть перевершувати традиційні кремнієві сонячні елементи. Вони пропонують можливість низьковитратного виробництва завдяки своїй залежності від методів обробки на основі розчинів та потенціалу для друку активних шарів на основі чорнил [69]. Перовскіти також можна ефективно використовувати в тандемних фотоелектричних елементах, укладених поверх кремнієвих сонячних елементів, для використання ширшого спектру сонячного світла та досягнення ще вищої загальної ефективності, ніж будь-яка з технологій окремо. Ці матеріали демонструють толерантність до дефектів, тобто вони відносно стійкі до недоліків у своїй кристалічній структурі, що може спростити виробничі вимоги. Перовскітні сонячні елементи можна виготовляти у вигляді тонких плівок, що забезпечує гнучкість та легкість, що робить їх придатними для застосувань, де традиційні жорсткі кремнієві панелі не ідеальні. Виробничі процеси перовскітів, як правило, простіші порівняно з кремнієвими, часто проводяться при нижчих температурах, що може ще більше знизити виробничі витрати та споживання енергії. Ключовою перевагою є регульована ширина забороненої зони перовскітних матеріалів, яку можна

регулювати, змінюючи їхній хімічний склад для оптимізації поглинання світла для конкретних застосувань або в тандемних конфігураціях елементів. Перовскітні сонячні елементи також демонструють хорошу продуктивність при нижчій інтенсивності освітлення, що робить їх потенційно придатними для застосування в приміщеннях або регіонах з меншою кількістю прямих сонячних променів.

Незважаючи на ці значні переваги, перовскітні сонячні елементи стикаються з кількома обмеженнями, які необхідно вирішити для успішної комерціалізації. Однією з найважливіших проблем є їхня значна стабільність, оскільки перовскітні матеріали мають тенденцію до деградації під впливом вологи, тепла, кисню та світла. Довгострокова стабільність перовскітних сонячних елементів є найважливішою проблемою, що перешкоджає їх широкій комерціалізації, оскільки деградація під впливом навколишнього середовища значно обмежує їхній термін служби та надійність для широкого використання [69]. Існують також проблеми з масштабуванням виробництва перовскітних сонячних елементів на великих площах, зберігаючи при цьому високу ефективність, досягнуту в невеликих лабораторних елементах. Досягнення однорідних та високоякісних перовскітних плівок на великих площах є значною перешкодою для масового виробництва, оскільки втрати ефективності можуть виникати при масштабуванні від невеликих лабораторних елементів до більших комерційних модулів. Багато високопродуктивних перовскітних композицій містять свинець, токсичний матеріал, що викликає занепокоєння щодо навколишнього середовища та здоров'я, які необхідно пом'якшити шляхом дослідження альтернатив без свинцю або надійних методів інкапсуляції. Токсичність свинцю в деяких перовскітних матеріалах потребує вирішення, оскільки екологічні норми та громадське схвалення можуть обмежувати використання свинцево-вмісних матеріалів у широкому споживчому застосуванні. Часто існує зворотна залежність між ефективністю та стабільністю в перовскітних сонячних елементах, що ускладнює одночасне досягнення високої продуктивності та тривалого терміну служби. Невизначеність у складних процесах кристалізації під час виробництва також може впливати на продуктивність та стабільність перовскітних елементів, оскільки різні методи та умови призводять до варіацій

якості тонких плівок. Ефективні методи інкапсуляції мають вирішальне значення для захисту перовскітних елементів від факторів навколишнього середовища та запобігання деградації. Нарешті, деякі перовскітні сонячні елементи демонструють явище гістерезису, коли виміряна ефективність залежить від умов вимірювання, що необхідно краще розуміти та контролювати для надійної оцінки продуктивності.

Органічні сонячні елементи (ОСЕ)

Органічні сонячні елементи (ОСЕ) пропонують кілька унікальних переваг, насамперед свою гнучкість та легку вагу, що дозволяє інтегрувати їх у широкий спектр поверхонь та портативних електронних пристроїв. Вони мають потенціал для низьковитратного виробництва з використанням методів друку, таких як рулонна обробка, що може значно знизити виробничі витрати порівняно з традиційними методами на основі кремнію [70]. Матеріали, що використовуються в ОСЕ, часто є в достатку, що зменшує занепокоєння щодо обмежень ланцюга поставок та волатильності цін, пов'язаних з деякими неорганічними матеріалами. Виробництво ОСЕ може бути екологічно чистим, з меншим вуглецевим слідом та потенціалом використання нетоксичних органічних сполук у деяких випадках. Ці елементи також можна налаштувати з точки зору кольору та прозорості, що дозволяє естетично інтегрувати їх у різні застосування, включаючи інтегровані в будівлі фотоелектричні системи (BIPV) та навіть сонячні вікна. ОСЕ можуть демонструвати покращену продуктивність в умовах низької освітленості порівняно з традиційними кремнієвими сонячними елементами, що робить їх придатними для застосування в приміщеннях та зонах зі змінним сонячним світлом. Їхні легкі та гнучкі властивості роблять їх особливо привабливими для інтегрованих у будівлі фотоелектричних систем (BIPV) та інтеграції в носимі технології. Крім того, деякі сонячні батареї (OSC), особливо ті, що використовують біорозкладні субстрати, можуть бути перероблені, що сприяє більш сталому життєвому циклу.

Незважаючи на ці переваги, OSC також стикаються зі значними обмеженнями. Їхня ефективність перетворення енергії, як правило, нижча порівняно з іншими типами сонячних елементів, включаючи як кремнієві елементи, так і інші тонкоплівкові технології, такі як CdTe та CIGS. Ця відносно низька ефективність є

основною перешкодою для їх широкого впровадження в застосуваннях, що потребують значної вихідної потужності, оскільки це вимагає більшої площі поверхні для досягнення порівнянної виробки енергії, збільшуючи витрати та обмежуючи застосування в умовах обмеженого простору [70]. Ще одним критичним обмеженням є їхній короткий термін служби через деградацію органічних матеріалів під впливом факторів навколишнього середовища, таких як ультрафіолетове випромінювання, волога та кисень. Обмежений термін служби OSC порівняно з традиційними сонячними панелями впливає на їхню довгострокову економічну життєздатність та вимагає постійних досліджень більш стабільних матеріалів та ефективних методів інкапсуляції. Поточні виробничі процеси OSC ще не повністю оптимізовані для великомасштабного комерційного використання, що перешкоджає їх широкому впровадженню в комунальних масштабах. Масштабування виробництва при збереженні продуктивності та економічної ефективності залишається значним інженерним завданням. Крім того, продуктивність OSC може знижуватися, коли активний шар потовщується, що іноді необхідно для великомасштабного виробництва, щоб запобігти утворенню точечних отворів, які можуть знизити ефективність. Зрештою, оптимальні умови для різних етапів роботи OSC, таких як поглинання світла, розщеплення екситонів, міграція носіїв заряду та збирання заряду, часто не ідеально узгоджуються, що призводить до невід'ємних втрат ефективності.

3.3 Потенціал для майбутнього зростання та впровадження

Майбутнє зростання та впровадження кожної технології тонкоплівкових безкремнієвих технологій у сонячній енергетиці буде зумовлене поєднанням факторів. Технологічний прогрес, що призводить до підвищення ефективності та збільшення терміну служби, має вирішальне значення для того, щоб усі ці технології стали більш конкурентоспроможними з традиційним кремнієм та одна з одною [71]. Зниження витрат, досягнуте завдяки вдосконаленню виробничих процесів,

оптимізації матеріалів та економії на масштабі, також відіграватиме значну роль у проникненні на ринок. Урядова політика та стимули, що підтримують розвиток відновлюваної енергетики та вітчизняне виробництво, можуть суттєво посилити впровадження цих технологій, що видно зі зростанням уваги до CdTe на ринку США завдяки торговельній політиці. Конкретні вимоги до застосування, які сприяють унікальним характеристикам кожної технології, також сприятимуть їх впровадженню на нішевих ринках. Наприклад, гнучкість CIGS та органічних сонячних елементів робить їх ідеальними для портативних пристроїв та інтегрованих у будівлі фотоелектричних систем, тоді як високий потенціал ефективності перовскітів є привабливим для тандемних елементів та застосувань з обмеженим простором. Вирішення екологічних проблем та проблем токсичності за допомогою інновацій матеріалів, таких як розробка безсвинцевих перовскітів та вдосконалення процесів переробки CdTe та CIGS, а також відповідальне управління кінцевим терміном служби будуть важливими для отримання ширшого визнання громадськістю та виконання нормативних вимог.

Потенційне проникнення кожної технології на ринок у найближчі роки залежатиме від її здатності вирішувати свої поточні обмеження та використовувати свої сильні сторони. Очікується, що телурид кадмію збереже свої сильні позиції на ринку комунальних приладів у США, з потенціалом зростання в інших регіонах та сферах застосування, оскільки ефективність та термін служби продовжують покращуватися. Селенід міді, індію, галію має потенціал розширити свою частку ринку, використовуючи свою високу ефективність та гнучкість, особливо у спеціалізованих застосуваннях та потенційно в комунальних проектах, оскільки виробничі витрати знижуються. Перовскітні сонячні елементи, якщо вони зможуть подолати проблеми зі стабільністю та ефективно масштабувати виробництво, мають потенціал стати революційною технологією, особливо в тандемних застосуваннях з кремнієм та в гнучких та недорогих сонячних рішеннях. Органічні сонячні елементи, ймовірно, знайдуть дедалі більше застосування на нішевих ринках, таких як портативна електроніка, носимна електроніка та інтегрована в будівлі фотоелектрична система, де їхні унікальні властивості переважають їхні поточні

обмеження щодо ефективності та терміну служби. Майбутній ринок сонячної енергії, ймовірно, буде різноманітним ландшафтом, де різні технології тонких плівок відіграватимуть значну роль у різних секторах, поряд із постійним домінуванням кристалічного кремнію. У таблиці 3.1 підсумовано сильні та слабкі сторони телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді-індію-галію (CIGS), перовскітних сонячних елементів та органічних сонячних елементів.

Таблиця 3.1 Порівняння різних сонячних елементів

Характеристика	Телурид кадмію (CdTe)	Селенід міді-індію-галію (CIGS)	Перовскітні сонячні елементи	Органічні сонячні елементи (OSCs)
Ефективність (комерційна)	18-22%	12-14%	Ще не комерціалізовано у великих масштабах	8-12%
Ефективність (рекордна)	23.1%	23.64%	26,7% (одинарний), 33,9% (тандемний)	19-20%
Вартість (оціночна, \$/Вт)	\$0.50 – \$1.00	\$0.60	Потенційно низька	Потенційно низька
Стабільність/ Термін служби	Покращення, історично коротше	Може швидко руйнуватися	Значні проблеми з вологою, теплом, киснем, світлом	Коротший термін служби, руйнується під впливом (УФ) випромінювання, вологи, кисню
Доступність матеріалів	Телур зустрічається рідко	Індій та галій зустрічаються рідко	Проблеми токсичності свинцю	Доступні органічні матеріали
Екологічний вплив	Проблеми токсичності кадмію	Зазвичай менш шкідливий	Проблеми токсичності свинцю	Менший вуглецевий слід, потенціал для нетоксичних матеріалів
Основні застосування	Масштаб комунального підприємства	Гнучка електроніка, потенціал масштабування	Тандемні комірки, гнучка електроніка	Гнучка електроніка, портативність

4 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

4.1 Комплексний огляд сонячних фотоелектричних технологій

Сонячна енергія стала критично важливим компонентом глобального переходу до стійких енергетичних систем. Її зростаюча важливість зумовлена необхідністю пом'якшення наслідків зміни клімату, підвищення енергетичної безпеки та диверсифікації енергетичних портфелів у всьому світі. Від енергопостачання окремих житлових будинків до великомасштабних комунальних підприємств, сонячні технології пропонують універсальне та дедалі конкурентоспроможніше рішення для виробництва електроенергії.

Монокристалічні кремнієві сонячні панелі вирізняються своїм виробничим процесом, який включає вирощування одного безперервного кристала кремнію. Цей метод дає кремній дуже високої чистоти, що безпосередньо призводить до високої ефективності отриманих сонячних елементів [72]. Процес зазвичай включає метод Чохральського або техніку флоат-зони для отримання циліндричного злитка монокристалічного кремнію, який потім нарізається на тонкі пластини для формування сонячних елементів [74]. Ці елементи збираються в панелі, що характеризуються однорідним темно-чорним виглядом [73].

Переваги монокристалічних кремнієвих панелей численні. Вони демонструють найвищу ефективність серед комерційно доступних технологій сонячних панелей, з коефіцієнтами конверсії від 17% до 22%, а деякі вдосконалені панелі перевищують 22%. Ця висока ефективність дозволяє виробляти більше енергії з меншої площі поверхні, що робить їх особливо придатними для застосувань з обмеженим простором, наприклад, на дахах житлових будинків у міських умовах. Монокристалічні панелі також демонструють чудову продуктивність в умовах низької освітленості та підтримують вищу ефективність при високих температурах порівняно з іншими типами завдяки нижчим температурним коефіцієнтам. Крім того, вони можуть похвалитися тривалим

терміном служби, який зазвичай становить від 25 до 40 років, що сприяє вищій довгостроковій окупності інвестицій, незважаючи на вищу початкову вартість.

Незважаючи на свою чудову продуктивність, монокристалічні кремнієві панелі також мають певні недоліки. Процес виробництва є більш складним та енергоємним, що призводить до вищих виробничих витрат порівняно з іншими технологіями.¹ Оскільки вони виготовлені з одного кристала кремнію, розмір окремих комірок, а отже, і панелей, може бути обмеженим, що потенційно може вимагати більшої кількості панелей для більших потреб у потужності [74]. Хоча вони загалом довговічні, вони можуть бути більш крихкими, ніж деякі інші типи панелей. Більша енергія, що входить до їх виробничого процесу, також є важливим фактором з екологічної точки зору. Крім того, хоча вони краще працюють при нагріванні, ніж полікристалічні панелі, надзвичайно високі температури все ще можуть впливати на їхню продуктивність.

Монокристалічні сонячні панелі в основному використовуються в житлових та комерційних установках, де цінується висока ефективність та естетика, а також у районах з обмеженим простором або менш стабільним сонячним світлом завдяки їхній чудовій роботі при низькій освітленості. Їхній довший термін служби та вища вихідна потужність роблять їх кращим вибором для домовласників, які прагнуть довгострокової економії енергії [73].

Полікристалічні кремнієві сонячні панелі виготовляються за допомогою процесу, який включає плавлення кількох фрагментів кремнію разом у формі, яка потім охолоджується та твердне, утворюючи багатокристалічну структуру. В результаті виготовляються сонячні елементи з видимими кристалічними зернами та характерним блакитним плямистим виглядом [73]. Процес виробництва простіший та менш енергоємний порівняно з монокристалічними панелями, що призводить до зниження виробничих витрат. Ця економічна ефективність робить полікристалічні панелі популярним вибором для широкого спектру застосувань [75].

Полікристалічні кремнієві панелі пропонують кілька переваг, насамперед їхню нижчу вартість, що робить сонячну енергію доступнішою для споживачів з обмеженим бюджетом та великомасштабних проєктів. Простіший процес

виробництва також призводить до меншої кількості відходів кремнію. Ці панелі демонструють хорошу довговічність та конкурентоспроможний термін служби, який зазвичай становить від 20 до 35 років [72]. Хоча вони загалом менш ефективні, ніж монокристалічні панелі, досягнення у виробництві скоротили цей розрив. Полікристалічні елементи також можна використовувати менших розмірів, що забезпечує певну гнучкість у встановленні.

Однак полікристалічні кремнієві панелі мають нижчі показники ефективності, зазвичай від 15% до 17%, і рідко перевищують 17%. Ця нижча ефективність означає, що для генерації такої ж кількості енергії потрібна більша площа поверхні порівняно з монокристалічними панелями. Вони також, як правило, мають нижчу продуктивність в умовах слабого освітлення та вищу швидкість деградації з часом. Блакитний, розсіяний вигляд часто вважається менш естетично приємним порівняно з однорідним чорним кольором монокристалічних панелей. Хоча деякі джерела стверджують, що вони менш чутливі до тепла, інші вказують на вищий температурний коефіцієнт, що призводить до більшого зниження ефективності з підвищенням температури [76].

Полікристалічні сонячні панелі добре підходять для великих сонячних електростанцій, де загальна площа не є основним обмеженням, а вартість є значним фактором. Вони також є життєздатним варіантом для житлових будинків з більшими дахами, де дещо нижчу ефективність можна компенсувати встановленням більшої кількості панелей. Їхній баланс вартості та продуктивності робить їх популярним вибором для багатьох застосувань, які шукають рішення для сталого енергопостачання.

Тонкоплівкові сонячні панелі представляють принципово інший підхід до фотоелектричної технології порівняно з кристалічними кремнієвими панелями. Вони виготовляються шляхом нанесення одного або кількох тонких шарів фотоелектричного матеріалу на підкладку, таку як скло, пластик або метал.¹ Ці шари можуть бути в сотні разів тоншими за традиційні кремнієві пластини, що надає тонкоплівковим панелям унікальних властивостей, таких як гнучкість та легка

вага. Основними типами тонкоплівкових сонячних панелей є телурид кадмію (CdTe), селенід міді-індію-галію (CIGS) та аморфний кремній (a-Si) [72].

Загалом, тонкоплівкові сонячні панелі мають кілька переваг. Їхня портативність та гнучкість роблять їх ідеальними для нетрадиційних застосувань, таких як портативні зарядні пристрої, рекреаційні транспортні засоби (RV) та інтеграція в криволінійні поверхні. Вони можуть бути дешевшими у виробництві, ніж кристалічні кремнієві панелі, завдяки меншим вимогам до матеріалів та простішим процесам. Багато тонкоплівкових технологій демонструють хорошу продуктивність в умовах низької освітленості та кращу стійкість до високих температур порівняно з кристалічним кремнієм. Їхня легка вага також спрощує транспортування та монтаж. Крім того, тонкоплівкова технологія дозволяє розробляти інтегровані в будівлі фотоелектричні системи (BIPV), де сонячні елементи вбудовані в будівельні матеріали, такі як вікна та покрівля.

Незважаючи на ці переваги, тонкоплівкові сонячні панелі зазвичай мають нижчу ефективність перетворення енергії порівняно з монокристалічними та полікристалічними кремнієвими панелями. Ця нижча ефективність вимагає більших установок для досягнення тієї ж вихідної потужності, що може бути суттєвим недоліком за обмеженого простору. Тонкоплівкові панелі також, як правило, мають коротший термін служби, який зазвичай становить від 10 до 20 років, і не так широко доступні для встановлення на дахах житлових будинків, як кристалічні кремнієві панелі [77].

Панелі з телуриду кадмію (CdTe) відомі своєю економічною ефективністю та високим рівнем поглинання сонячного світла. Вони можуть досягати ефективності, порівнянної з традиційними кремнієвими панелями, і широко використовуються у великих сонячних електростанціях комунального масштабу. Однак використання кадмію, токсичного важкого металу, викликає занепокоєння щодо екологічної утилізації та переробки цих панелей.

Панелі з селеніду міді, індію, галію (CIGS) пропонують ефективність, яка може конкурувати з традиційними кремнієвими панелями, та демонструють чудову продуктивність за умов слабого освітлення та високих температур [78]. Деякі

панелі CIGS можна виготовляти на гнучких підкладках і вважаються більш екологічними, ніж CdTe, оскільки вони використовують менший відсоток кадмію, а деякі моделі навіть використовують цинк. Однак панелі CIGS, як правило, дорожчі у виробництві, а процес їх виробництва може бути складним.

Панелі з аморфного кремнію (a-Si) використовують менше матеріалів та менше токсичних речовин у своєму виробництві, що робить їх більш екологічно безпечним варіантом порівняно з іншими тонкоплівковими технологіями. Вони дуже гнучкі та довговічні, добре працюють за умов слабкого освітлення та спекотної погоди. Однак, панелі a-Si мають значно нижчі показники ефективності порівняно з панелями з кристалічного кремнію та схильні до швидшої деградації, що призводить до коротшого терміну служби [78]. Вони також мають труднощі з роботою за температур нижче нуля.

Фундаментальний принцип роботи сонячних панелей полягає в фотоелектричному ефекті – процесі, коли сонячне світло безпосередньо перетворюється на електричну енергію [79]. Це явище відбувається в напівпровідникових матеріалах, найчастіше в кремнії, який спеціально обробляється або «легується» для створення електричного поля.

Процес починається, коли фотони, елементарні частинки світла, потрапляють на поверхню сонячного елемента. Якщо ці фотони мають достатню енергію, вони можуть поглинатися напівпровідниковим матеріалом, зазвичай атомами кремнію, що призводить до збудження електронів та їхнього вивільнення зі своїх атомних зв'язків. Цей процес створює електрон-діркові пари, де електрони негативно заряджені та рухливі, а дірки представляють відсутність електрона, фактично несучи позитивний заряд. Р-n перехід, утворений легуванням одного шару кремнію електронодефіцитним елементом (р-тип) та іншого електронобагатим елементом (n-тип), створює внутрішнє електричне поле. Це електричне поле діє як односторонній клапан, змушуючи вивільнені електрони рухатися до шару n-типу, а дірки – до шару р-типу. Коли зовнішнє електричне коло підключено до сонячного елемента, потік цих електронів утворює електричний струм, який є постійним струмом (DC) [79]. Цей постійний струм потім зазвичай перетворюється на змінний струм (AC)

інвертором для використання в будинках та на підприємствах або для передачі в енергосистему.

На ефективність фотоелектричного перетворення, співвідношення вихідної електричної потужності до потужності падаючого сонячного світла, впливає безліч факторів. Властивість матеріалу напівпровідника, включаючи його чистоту та кристалічну структуру, відіграє вирішальну роль. Наприклад, високовпорядкована монокристалічна структура монокристалічного кремнію забезпечує ефективніший потік електронів порівняно з багатокристалічною структурою полікристалічного кремнію або некристалічною структурою аморфного кремнію. Інтенсивність та спектр сонячного світла безпосередньо впливають на кількість фотонів, доступних для збудження електронів; вища інтенсивність зазвичай призводить до більшого збудження електронів і, отже, до вищої ефективності. Температура сонячного елемента також суттєво впливає на його продуктивність; зазвичай ефективність знижується зі збільшенням температури. Конструкція та будівництво сонячної панелі, включаючи використання антиблікових покриттів для максимізації поглинання світла та розташування елементів, також сприяють загальній ефективності. Затінення від будь-яких перешкод може значно зменшити кількість сонячного світла, що досягає сонячних елементів, що призводить до зниження вироблення енергії. Кут, під яким сонячне світло падає на панель, також має вирішальне значення; максимальна енергія виробляється, коли сонячне світло перпендикулярне до поверхні панелі. З часом сонячні панелі зазнають деградації, поступового зниження їхньої вихідної потужності, зазвичай зі швидкістю від 0,5% до 0,8% на рік [72].

4.2 Передові концепції збору сонячної енергії

Хоча термін «еліптичні сонячні електростанції» не означає широко визнаної окремої категорії технології виробництва сонячної енергії, концепція еліптичної геометрії використовується в певних компонентах певних сонячних енергетичних

систем, головним чином в установках концентрованої сонячної енергії (CSP). Дослідження показують, що еліптичні трубки досліджуються та використовуються в проектуванні приймачів для сонячних веж, з метою підвищення теплової ефективності та терміну служби [80]. Крім того, еліптичні приймачі згадуються як тип лінійного концентрованого сонячного колектора.

У контексті сонячних веж, високі витрати, пов'язані з полем геліостату, та експлуатаційні проблеми приймача спонукали до вивчення альтернативних геометрій трубок, включаючи еліптичні форми. Конструкція еліптичного трубчастого приймача передбачає розташування цих трубок у конфігурації, яка максимізує поглинання концентрованого сонячного випромінювання, відбитого від поля геліостатів [80]. Принцип роботи подібний до приймачів, що використовують круглі трубки: теплоносій, такий як розплавлена сіль або повітря, протікає через трубки та нагрівається до високих температур інтенсивним сонячним випромінюванням. Ця високотемпературна рідина потім подає тепло до стандартного термодинамічного циклу, зазвичай пароподібного циклу Ренкіна, для вироблення електроенергії [81]. Еліптична геометрія труб пропонує потенційні переваги з точки зору теплової ефективності. Дослідження з використанням теплових моделей показують, що еліптичні трубки можуть підвищити ефективність завдяки покращеному радіаційному обміну з навколишнім середовищем, що призводить до зменшення радіаційних втрат тепла порівняно з традиційними круглими трубками. Механічно, еліпсоїдальна геометрія вікна приймача може усунути розтягувальні напруження, гарантуючи, що вікно повністю стискається, що є корисним для роботи при високій температурі та високому тиску [81].

Порівняно зі звичайними плоскпанельними фотоелектричними системами, сонячні вежі з еліптичними трубчастими приймачами представляють собою інший технологічний підхід. Плоскпанельні фотоелектричні системи безпосередньо перетворюють сонячне світло на електроенергію за допомогою фотоелектричного ефекту, тоді як системи CSP спочатку концентрують сонячне світло для виробництва тепла, яке потім перетворюється на електроенергію за допомогою теплового двигуна. Технології CSP, включаючи ті, що мають еліптичні трубчасті

приймачі, зазвичай є більш ефективними при вищих температурах і часто поєднуються з накопиченням теплової енергії, що дозволяє виробляти електроенергію навіть тоді, коли сонце не світить. Однак, вони потребують прямого сонячного світла та систем відстеження для постійного фокусування сонячних променів на приймач, що робить їх менш ефективними в хмарних умовах порівняно з фотоелектричними системами, які можуть використовувати як пряме, так і розсіяне сонячне світло. Виробництво некруглих труб, таких як еліптичні трубки, також може бути складнішим, ніж виготовлення стандартних круглих труб, що потенційно впливає на вартість.

Еліптичні приймачі, з іншого боку, функціонують як лінійні концентровані сонячні колектори. Вони використовують відбивач з еліптичним поперечним перерізом для концентрації прямої сонячної енергії на абсорбційній трубі, розташованій у фокусі еліпса. Тепло, поглинене рідиною, що протікає через приймач, потім може бути використане для різних застосувань, включаючи виробництво електроенергії за температур до 400°C . Було показано, що заміна звичайного круглого абсорбера в параболічному жолобчастому колекторі на еліптичний абсорбер покращує корисну теплопередачу та ефективність колектора.

Сонячні колектори – це пристрої, призначені для захоплення сонячного випромінювання та перетворення його на теплову енергію для нагрівання води або повітря. Ці колектори загалом класифікуються на три основні типи: плоскі пластинчасті колектори, вакуумні трубчасті колектори та концентруючі колектори [82].

Плоскі пластинчасті колектори – це неконцентруючі колектори, тобто площа, що перехоплює сонячне випромінювання, така ж, як і площа, що його поглинає. Типовий плоский пластинчастий колектор складається з ізольованої металевої коробки з темною абсорбуючою пластиною, часто виготовленою з міді, сталі або алюмінію, та однієї або кількох прозорих кришок (склення) зі скла або пластику. До абсорбуючої пластини прикріплені трубки або канали для перенесення теплоносія, який може бути рідиною (водою або гліколем) або повітрям [83]. Плоскі пластинчасті колектори зазвичай використовуються для нагрівання води в житлових

приміщеннях, опалення приміщень та підігріву басейнів, зазвичай працюючи при температурі нижче $90-100^{\circ}\text{C}$. Їхня ефективність, як правило, нижча порівняно з вакуумними трубчастими колекторами, з типовою тепловою ефективністю від 50% до 60%, хоча вищої ефективності можна досягти за допомогою таких удосконалень, як селективні покриття та вакуумна ізоляція. Плоскі колектори відносно прості у виготовленні, мають нижчу вартість і можуть використовувати як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання. Однак вони мають більші втрати тепла та повільнішу швидкість генерації тепла порівняно з вакуумними трубчастими колекторами.

Вакуумні трубчасті колектори використовують серію скляних трубок, кожна з яких містить металеву абсорбційну трубку, оточену вакуумом. Вакуум між внутрішньою та зовнішньою скляними трубками значно зменшує втрати тепла через теплопровідність та конвекцію, що дозволяє вакуумним трубчастим колекторам досягати вищих температур, від 75°C до 180°C або навіть вище. Існує два поширених типи: колектори з тепловими трубками, де теплова трубка передає тепло від абсорбера до колектора, та U-подібні трубчасті колектори, де теплоносій протікає безпосередньо через трубки. Вакуумні трубчасті колектори є високоефективними, особливо в холодному кліматі та взимку, і добре працюють навіть у хмарних умовах. Вони довговічніші, ніж плоскі колектори, завдяки відсутності конвекції у вакуумі та легші в установці, оскільки складаються з окремих легких трубок. Однак вони дорожчі за плоскі колектори та можуть бути більш крихкими через скляну конструкцію.⁷⁸

Концентруючі колектори використовують відбивні поверхні (дзеркала) або заломлюючі елементи (лінзи) для фокусування сонячного світла на меншій площі поглинач, тим самим досягаючи набагато вищих температур, ніж неконцентруючі колектори [84]. Ці колектори можуть досягати температур вище 100°C і в основному використовуються для застосувань, що потребують високої температури, таких як нагрівання промислових процесів та виробництво електроенергії на установках CSP. Концентруючі колектори використовують лише пряме сонячне випромінювання та зазвичай потребують систем відстеження для відстеження руху сонця. Різні типи

включають параболічні жолобчасті колектори, лінійні відбивачі Френеля, параболічні тарілчасті колектори та вежі сонячної енергії, кожна з яких має різні коефіцієнти концентрації та температурні можливості. Хоча вони мають потенціал для дуже високої ефективності, концентруючі колектори мають високі початкові витрати та практичні лише в регіонах з високою прямою сонячною інсоляцією [84].

4.3 Стратегічне впровадження систем сонячної генерації

Встановлення сонячних панелей на дахах будівель пропонує численні переваги, особливо в міських умовах, де доступність земельних ділянок обмежена. Використовуючи існуючу інфраструктуру, дахові сонячні системи значно зменшують потребу у виділених земельних ділянках, тим самим зменшуючи конфлікти та витрати щодо землекористування [85]. Такий розподілений підхід до генерації підвищує енергетичну незалежність на рівні будівлі та громади, зменшуючи залежність від централізованих електростанцій та ліній електропередачі на великі відстані.

Основною перевагою для власників будівель є суттєве зменшення або навіть усунення щомісячних рахунків за електроенергію, що призводить до значної довгострокової фінансової економії протягом 25-35 років терміну служби типової системи сонячних панелей. Дослідження також показали, що будинки з встановленими сонячними панелями часто відчувають зростання вартості нерухомості, що робить їх вигідною фінансовою інвестицією. З екологічної точки зору, дахова сонячна енергія є чистим та відновлюваним джерелом енергії, яке не виробляє викидів вуглецю під час експлуатації, сприяючи скороченню викидів парникових газів та боротьбі зі зміною клімату.

Багато юрисдикцій пропонують програми чистого обліку, що дозволяє власникам дахових сонячних систем отримувати кредити або платежі за будь-яку надлишкову електроенергію, що виробляється та повертається назад до комунальної мережі [85]. Крім того, часто доступні різні федеральні, державні та місцеві

податкові пільги, знижки та стимули, що ще більше знижує початкові інвестиційні витрати та покращує економічну вигідність сонячних панелей на дахах. У поєднанні з системами акумуляторного зберігання енергії, сонячні установки на дахах також можуть забезпечити надійне резервне живлення під час відключень у мережі, підвищуючи енергетичну стійкість та безпеку для домогосподарств та підприємств. Широке впровадження сонячних панелей на дахах сприяє загальній стабільності та надійності енергосистеми, забезпечуючи розподілені енергетичні ресурси. Крім того, підприємства та організації, які вирішили встановити сонячні панелі на своїх дахах, можуть покращити свій публічний імідж і потенційно отримати кредити для сертифікації зеленого будівництва, такої як LEED та WELL, демонструючи відданість принципам сталого розвитку.

Для максимізації вироблення енергії від сонячної енергетичної системи необхідна ретельна оцінка сонячного потенціалу місця встановлення. Це включає оцінку кількох ключових факторів, включаючи кількість сонячного світла, яке отримує місце, кут падіння сонця протягом дня та року, а також будь-яке потенційне затінення від навколишніх об'єктів. Географічне розташування та клімат є фундаментальними визначальними факторами сонячного потенціалу, причому регіони, які отримують вищий рівень сонячного світла, зазвичай мають більший потенціал. Орієнтація та нахил даху або доступної земельної ділянки також є критичними; у Північній півкулі орієнтація на південь ідеально підходить для захоплення максимальної кількості сонячного світла. Будь-яке затінення від дерев, сусідніх будівель або інших високих споруд може значно знизити продуктивність сонячних панелей і має бути ретельно оцінено. Доступний простір для розміщення панелей, а також тип і стан конструкції даху також є важливими факторами [86].

Існують різні інструменти та методології для оцінки сонячного потенціалу. Калькулятори кута падіння сонця, як онлайн, так і у формі додатків, можуть допомогти визначити кут падіння сонця в певному місці. Комплексне обстеження місця встановлення сонячної енергії, яке часто проводять фахівці з сонячної енергетики, включає фізичний огляд та вимірювання для оцінки всіх відповідних факторів. Крім того, кілька онлайн-інструментів, таких як PVWatts від Національної

лабораторії відновлюваної енергії (NREL), Google Project Sunroof та Sun Number, використовують супутникові знімки та дані про опромінення для оцінки сонячного потенціалу для певних місць. Кількість сонячної радіації, отриманої в певному місці, зазвичай вимірюється сонячною інсоляцією, що виражається в кіловат-годинах на квадратний метр на день ($\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 / \text{день}$) або ватах на квадратний метр ($\text{Вт} / \text{м}^2$).

Вибір оптимального кута нахилу або кута нахилу для сонячних панелей має вирішальне значення для максимізації виробництва енергії. Кут нахилу впливає на те, як безпосередньо сонячне світло потрапляє на панелі протягом дня та в різні пори року. Загальноприйнятим правилом є встановлення кута нахилу приблизно рівним широті місця встановлення для оптимальної цілорічної роботи. Однак сезонні коригування можуть ще більше покращити захоплення енергії. У літні місяці, коли сонце знаходиться вище на небі, часто рекомендується кут нахилу на 10-15 градусів менший за широту, тоді як взимку, коли сонце знаходиться нижче, додавання 10-15 градусів до широти може бути корисним. Також доступні точніші формули для розрахунку оптимального кута нахилу на основі широти та пори року. При визначенні ідеального кута нахилу слід враховувати конкретні енергетичні цілі системи, такі як максимізація загального річного виробництва порівняно з оптимізацією для певного сезону. Існуючий кут нахилу даху також може впливати на досяжний кут нахилу. Хоча системи з фіксованим нахилом є поширеними, більш досконалі системи використовують механізми відстеження для автоматичного регулювання кутів нахилу та азимуту панелей, щоб вони постійно слідували за траєкторією сонця, максимізуючи захоплення енергії, але також збільшуючи складність та вартість системи.

Підключення сонячних панелей до існуючої електромережі є вирішальним кроком для більшості систем сонячної енергії, що дозволяє домовласникам та підприємствам використовувати вироблену електроенергію та потенційно отримувати компенсацію за надлишок енергії. Процес включає кілька ключових компонентів та кроків. Сонячні панелі виробляють постійний струм (DC), який необхідно перетворити на змінний струм (AC), щоб бути сумісним з мережею та більшістю побутових приладів. Це перетворення здійснюється за допомогою

інверторів. Трансформатори можуть використовуватися для регулювання напруги електроенергії відповідно до вимог ліній передачі та розподілу. Підключення до мережі зазвичай відбувається на щиті обслуговування будівлі, або на стороні навантаження (після головного автоматичного вимикача), або на стороні лінії чи живлення (до головного автоматичного вимикача). Це взаємоз'єднання вимагає схвалення місцевої комунальної компанії, що включає процес подання заявки для забезпечення безпеки та сумісності сонячної системи з мережею.

Істотною перевагою мережевих сонячних систем є можливість використання нетто-лічильника. У районах з політикою нетто-лічильника будь-яка надлишкова електроенергія, вироблена сонячними панелями, яка не використовується будівлею негайно, може бути повернута в мережу, а власник системи отримує кредити у своєму рахунку за електроенергію за цю надлишкову енергію [87]. Це ефективно дозволяє мережі діяти як віртуальна батарея, забезпечуючи економічно ефективний спосіб зберігання надлишкової сонячної енергії. Все частіше використовуються вдосконалені «розумні» інвертори, що пропонують інтелектуальне управління потоком енергії та покращену взаємодію з мережею.

Хоча системи, підключені до мережі, пропонують численні переваги, інтеграція систем накопичення енергії (акумуляторів) може ще більше розширити їхні можливості. Однією з основних переваг використання батарей із сонячною системою, підключеною до мережі, є забезпечення резервного живлення під час відключення комунальних послуг. Без батарей більшість сонячних систем, підключених до мережі, автоматично вимикаються під час відключення електроенергії з міркувань безпеки. Батареї також дозволяють оптимізувати власне споживання сонячної енергії, зберігаючи надлишок енергії, що виробляється протягом дня, для використання в періоди пікового навантаження або вночі, тим самим зменшуючи залежність від електроенергії з мережі та потенційно призводячи до більшої економії, особливо в районах з тарифами на електроенергію за часом використання. Ця підвищена самозабезпеченість також підвищує енергетичну незалежність та стійкість [87]. У регіонах з частими відключеннями електроенергії спокій, який забезпечує система резервного живлення від батарей, може бути

значною перевагою. Крім того, в деяких випадках домовласники з акумуляторними накопичувачами можуть брати участь у комунальних програмах, які забезпечують стимули для внеску в стабільність мережі під час пікового навантаження.

Однак, існують також недоліки, пов'язані з використанням батарей у сонячних системах, підключених до мережі. Початкова вартість придбання та встановлення батарей може бути значною, що являє собою значні додаткові інвестиції порівняно з системою, що працює виключно на сонячній енергії та підключена до мережі. Батареї мають обмежену ємність зберігання, якої може бути недостатньо для задоволення всіх потреб в енергії протягом тривалих періодів без сонячного світла або живлення від мережі. Вони також потребують періодичного обслуговування та мають обмежений термін служби, зазвичай потребуючи заміни кожні 5-15 років, що збільшує довгострокові експлуатаційні витрати. Неправильне встановлення або обслуговування також може призвести до проблем із безпекою. Крім того, існують втрати енергії, пов'язані із заряджанням та розряджанням батарей, що може знизити загальну ефективність системи. У районах з дуже сприятливою політикою чистого обліку економічні вигоди від додавання батарей для енергетичного арбітражу (зберігання енергії, коли вона дешева, та використання її, коли вона дорога) можуть бути незначними або відсутніми.

4.4 Утилізація сонячних панелей

Сонячні панелі розроблені для тривалого терміну служби, який зазвичай становить від 25 до 30 років, що робить їх довговічним компонентом систем відновлюваної енергетики. Хоча вони продовжують виробляти електроенергію і після цього періоду, їхня продуктивність поступово знижується з часом, із середньорічним темпом деградації від 0,5% до 0,8%. Цей тривалий термін служби та швидкозростаюче використання сонячної енергії означають, що в найближчі десятиліття очікується значний обсяг сонячних панелей, що створює значну проблему для управління відходами.

Сонячні панелі складаються з різних матеріалів. Більшість сонячних панелей використовують кремній як основний напівпровідниковий матеріал, або в кристалічній формі (монокристалічний та полікристалічний), або як аморфний кремній у тонкоплівкових технологіях. Тонкоплівкові сонячні панелі також використовують інші напівпровідникові матеріали, такі як телурид кадмію (CdTe) та селенід міді-індію-галію (CIGS) [72]. Інші матеріали, які зазвичай використовуються в сонячних панелях, включають скляний захисний лист, алюмінієвий каркас, мідний дріт, полімерні герметики, срібні контакти та меншу кількість різних інших металів, таких як телур, кадмій, індій, галій, селен, свинець, олово, сурма та цинк.

Різноманітний матеріальний склад сонячних панелей має значні наслідки для управління відходами. Панелі з закінченням терміну служби містять цінні та критичні матеріали, такі як кремній, срібло та мідь, які можна відновити та повторно використовувати, сприяючи циркулярній економіці в сонячній промисловості. Однак деякі з цих матеріалів, включаючи кадмій та свинець, є небезпечними та потребують ретельного поводження та утилізації, щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища. Величезний обсяг очікуваних відходів сонячних панелей підкреслює нагальну потребу в ефективних та стійких рішеннях щодо управління закінченням терміну служби.

Переробка сонячних панелей включає низку процесів, спрямованих на відновлення цінних матеріалів та мінімізацію впливу на навколишнє середовище. Традиційні методи переробки включають механічні, термічні та хімічні процеси [88]. Механічна переробка зазвичай включає демонтаж панелі, видалення алюмінієвої рами та розподільної коробки, подрібнення решти матеріалів, а потім використання таких методів, як просіювання та магнітна сепарація, для розділення скла, металів та кремнію. Хоча цей метод є відносно простим, він часто призводить до отримання відновлених матеріалів нижчої якості. Термічна переробка передбачає нагрівання панелей до високих температур для випаровування та розділення різних матеріалів, що ефективно відновлює скло та алюміній, але потенційно призводить до втрати цінного кремнію та металів. Хімічна переробка використовує розчинники

для розчинення та розділення матеріалів, досягаючи високих показників відновлення кремнію та металів, але часто за участю небезпечних хімічних речовин.

Розробляються нові інноваційні методи для підвищення ефективності та екологічної стійкості переробки сонячних панелей. Передові механічні процеси включають автоматизовані системи для точного демонтажу та електростатичного розділення для підвищення чистоти відновленого кремнію та металів. Термохімічна переробка поєднує термічні та хімічні процеси, такі як піроліз (нагрівання в безкисневому середовищі) та гідротермальна обробка (використання води високої температури під тиском), для оптимізації відновлення матеріалів, включаючи високочистий кремній та метали, з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Біологічна переробка, яка все ще перебуває на експериментальних стадіях, досліджує використання мікроорганізмів або ферментів для розщеплення органічних компонентів та відновлення металів. Розробляються лазерні методи переробки для точного видалення та відновлення високочистого кремнію та металів, що зменшує кількість відходів та підвищує ефективність. Інші нові методи включають переробку на основі розчинників, надкритичне розшарування CO₂ та селективне хімічне травлення для відновлення сонячних елементів вищої чистоти [88]. Для нових перовскітних сонячних елементів розробляються методи переробки на водній основі для екологічно безпечного відновлення ключових матеріалів. Значною метою цих інноваційних методів є покращення відновлення високоцінних матеріалів, таких як срібло та кремній, що робить переробку сонячних панелей більш економічно вигідною. Кінцевою метою є перехід до моделі циркулярної економіки для сонячної енергетики, де панелі, що вийшли з експлуатації, перетворюються на нові матеріали для нових панелей та інших продуктів.

Нормативно-правовий ландшафт щодо утилізації та переробки сонячних панелей все ще розвивається, через брак єдиних глобальних правил. Європейський Союз (ЄС) взяв на себе провідну роль, запровадивши обов'язкову переробку фотоелектричних (PV) панелей відповідно до Директиви про відходи електричного та електронного обладнання. Ця директива вимагає від виробників забезпечити належну переробку своєї продукції без жодних витрат для власника.

У Сполучених Штатах немає федеральних правил, які б спеціально вимагали переробки сонячних панелей, хоча деякі панелі з закінченням терміну служби можуть бути класифіковані як небезпечні відходи згідно із Законом про збереження та відновлення ресурсів залежно від вилуговування токсичних хімічних речовин, таких як свинець та кадмій. Однак кілька штатів запровадили власні закони та політику щодо переробки сонячних панелей. Наприклад, штат Вашингтон вимагає від виробників, які продають сонячні панелі після 1 липня 2017 року, фінансувати та забезпечувати програми переробки своєї продукції. Каліфорнія класифікує сонячні панелі з закінченням терміну служби як універсальні відходи, що спрощує вимоги до управління збором та переробкою. Інші штати, такі як Гаваї, Нью-Джерсі та Північна Кароліна, також мають політику щодо закінчення терміну служби. Агентство з охорони навколишнього середовища США наразі планує запропонувати нові правила для покращення управління та переробки сонячних панелей, що завершили термін служби, шляхом додавання їх до універсальних правил щодо відходів, з метою створення чіткої та практичної системи поводження з викинутими панелями та сприяння переробці.

Розробка ефективної інфраструктури переробки має першорядне значення для управління зростаючим обсягом відходів сонячних панелей. Наразі рівень переробки сонячних панелей у США є відносно низьким, близько 10%. Створення надійної інфраструктури вимагає значних інвестицій у спеціалізовані переробні підприємства та розробки ефективних та економічно вигідних технологій переробки. Економічні стимули та підтримуюча державна політика мають вирішальне значення для того, щоб зробити переробку більш фінансово привабливим варіантом порівняно з захороненням на сміттєзвалищах. Добре розвинена галузь переробки сонячних панелей має потенціал для створення нових робочих місць у секторі зеленої енергетики та сприяння економічному зростанню. Крім того, сильна інфраструктура переробки допоможе зберегти цінні ресурси, зменшити вплив відходів сонячних панелей на навколишнє середовище та забезпечити довгострокову стійкість індустрії сонячної енергетики.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження екологічної безпеки сонячної генерації в контексті декарбонізації Вінницької області можна сформулювати наступні висновки:

1. Аналіз сучасного стану декарбонізації економіки України і світу засвідчив, що перехід до відновлювальних джерел енергії є пріоритетним напрямком глобального енергетичного переходу. Україна демонструє позитивну динаміку у впровадженні природоохоронних технологій та енергозберігаючих заходів, особливо в об'єктах соціальної інфраструктури. Вінницька область посідає провідні позиції серед регіонів України за темпами розвитку сонячної енергетики, що створює сприятливі передумови для подальшого зменшення вуглецевого сліду регіону.

2. Дослідження планарної технології виробництва кремнію для сучасних сонячних панелей показало, що метод Чохральського залишається основним способом вирощування високоякісних кристалів кремнію. Цей процес забезпечує необхідну чистоту та структурну досконалість матеріалу, що є критично важливим для ефективності фотоелектричних перетворювачів. Водночас, енергоємність даного процесу потребує подальшої оптимізації з метою зменшення екологічного впливу на етапі виробництва.

3. Аналіз інноваційних технологій виробництва некремнієвих тонкоплівкових фотопанелей виявив їх значний потенціал для майбутнього розвитку сонячної енергетики. Тонкоплівкові технології на основі телуриду кадмію, селеніду міді-індію-галію та аморфного кремнію демонструють конкурентоспроможність за собівартістю виробництва, однак мають певні обмеження щодо ефективності та довговічності порівняно з кристалічними кремнієвими панелями.

4. Комплексний огляд конструктивних особливостей сонячних електростанцій підтвердив важливість системного підходу до проектування та експлуатації сонячних установок. Передові концепції збору сонячної енергії, включаючи системи

відстеження сонця та концентровані фотоелектричні системи, дозволяють значно підвищити ефективність енергогенерації. Стратегічне впровадження систем сонячної генерації у Вінницькій області має враховувати місцеві кліматичні умови, наявну інфраструктуру та регіональні енергетичні потреби.

Питання утилізації сонячних панелей набуває особливої актуальності у контексті масштабного розвитку сонячної енергетики. Розроблені технології переробки дозволяють повернути у виробничий цикл до 95% матеріалів відпрацьованих панелей, що суттєво знижує їх екологічний вплив протягом повного життєвого циклу. Створення регіональної системи збору та переробки сонячних панелей у Вінницькій області є необхідною умовою забезпечення екологічної безпеки розвитку сонячної енергетики.

Для забезпечення екологічної безпеки сонячної генерації у Вінницькій області рекомендується розробити комплексну стратегію, що включає удосконалення нормативно-правової бази, створення інфраструктури для утилізації відпрацьованого обладнання, стимулювання впровадження найбільш екологічно безпечних технологій та підготовку кваліфікованих кадрів для галузі відновлювальної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полив'янчук А. П., Гура К. Ю., Петрук В. Г. Підвищення ефективності декарбонізації об'єктів соціальної інфраструктури методом раціонального впровадження інноваційних природоохоронних технологій: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2025.
2. Climate Analytics. When will global emissions peak? 2023. URL: <https://ca1-clm.edcdn.com/assets/When-will-global-greenhouse-gas-emissions-peak.pdf> (дата звернення: 01.03.2025).
3. IRENA. World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf (дата звернення: 01.03.2025).
4. Climate Analytics. The IEA just published its 2024 World Energy Outlook: what does it say? 2024. URL: <https://climateanalytics.org/comment/the-iea-just-published-its-2024-world-energy-outlook-what-does-it-say> (дата звернення: 01.03.2025).
5. Інститут Реформ та Фінансів. Резюме моніторингу декарбонізації за II–III квартал 2024 року. URL: <https://www.irf.ua/en/rezume-monitoryngu-dekarbonizacziyi-za-ii-iii-kvartal-2024/> (дата звернення: 01.03.2025).
6. CEPA. Better Energy Solutions for Ukraine. URL: <https://cepa.org/article/better-energy-solutions-for-ukraine/> (дата звернення: 01.03.2025).
7. Energy Actua. Solar Energy in Local Communities: Opportunities for Development or Risks? URL: <https://www.energyactua.com/uk/solar-energy-in-local-communities-opportunities-for-development-or-risks> (дата звернення: 01.03.2025).
8. Ember. Global Electricity Review 2024. URL: <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf> (дата звернення: 01.03.2025).
9. RMI. The Top Ten Climate Developments of 2024. URL: <https://rmi.org/the-top-ten-climate-developments-of-2024/> (дата звернення: 01.03.2025).

10. Deloitte Insights. 2025 Renewable Energy Industry Outlook. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/renewable-energy/renewable-energy-industry-outlook.html> (дата звернення: 01.03.2025).

11. Top 6 Climate Tech Trends for 2025: Innovations in Sustainability // Carbon Trail. – 2025. – Режим доступу: <https://carbontrail.net/blog/top-6-climate-tech-trends-for-2025/>

12. Decarbonization Trends to Follow for 2025 // Zeigo. – 2025. – Режим доступу: <https://www.zeigo.com/2025/01/28/zeigo-top-decarbonization-trends-2025/>

13. 4 key trends to watch in clean energy technology in 2025 // World Economic Forum. – 2025. – Режим доступу: <https://www.weforum.org/stories/2025/01/4-key-trends-to-watch-in-clean-energy-technology-in-2025/>

14. Renewable energy // UkraineInvest. – Режим доступу: <https://ukraineinvest.gov.ua/en/industries/energy/renewable-energy/>

15. Ukraine's energy system under attack – Ukraine's Energy Security and the Coming Winter – Analysis // International Energy Agency. – 2024. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack>

16. A Solar Marshall Plan for Ukraine // Greenpeace. – 2024. – Режим доступу: <https://www.greenpeace.de/publikationen/20240607-greenpeace-report-BE-solar-marshallplan-ukraine-encv.pdf>

17. Ripples of War: The Russia-Ukraine Conflict's Impact on Global Carbon Dioxide Emissions and Climate Change // Chintan. – 2024. – Режим доступу: <https://chintan.indiafoundation.in/articles/ripples-of-war-the-russia-ukraine-conflicts-impact-on-global-carbon-dioxide-emissions-and-climate-change/>

18. Integrating Ukraine's Energy Sector into the EU // Clingendael Institute. – 2024. – Режим доступу: https://www.clingendael.org/sites/default/files/2024-09/EU-Ukraine_Energy_Cooperation.pdf

19. Mishchenko O. In 2025, the Decarbonization Fund expects 1.7 billion hr // UA-Energy. – 2024. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/en/posts/09-11-2024>

20. Introduction of the framework for a market-based support scheme for renewable energy // Energy Community. – 2024. – Режим доступа: <https://www.energy-community.org/dam/jcr:6b4f404e-289b-4717-b791-aca78d4c8c7c/Note15.pdf>

21. Ray of Hope: Ukraine Energy Support Fund boosts Ukrainian hospitals with solar power // Energy Community. – 2025. – Режим доступа: <https://www.energy-community.org/news/Energy-Community-News/2025/02/12.html>

22. Ukraine Sustainable Energy Lending Facility (USELF) // UNFCCC. – Режим доступа: <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/activity-database/momentum-for-change-ukraine-sustainable-energy-lending-facility>

23. Greenpeace Study: Ukraine Needs a Solar Energy Marshall Plan // Greenpeace Ukraine. – Режим доступа: <https://www.greenpeace.org/ukraine/en/investigations-reports/1318/greenpeace-study-ukraine-needs-a-solar-energy-marshall-plan/>

24. Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions // OAE Publishing Inc. – 2024. – Режим доступа: <https://www.oaepublish.com/articles/cf.2024.48>

25. Green and energy-efficient solutions for future-ready infrastructure // PlanRadar. – Режим доступа: <https://www.planradar.com/sa-en/green-energy-efficient-solutions-future-ready-infrastructure/>

26. The Top Ten Climate Developments of 2024 // RMI. – 2024. – Режим доступа: <https://rmi.org/the-top-ten-climate-developments-of-2024/>

27. Decarbonizing U.S. Buildings // Center for Climate and Energy Solutions (C2ES). – Режим доступа: <https://www.c2es.org/document/decarbonizing-u-s-buildings/>

28. Emissions savings – Multiple Benefits of Energy Efficiency 2019 – Analysis // IEA. – 2019. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency-2019/emissions-savings>

29. Energy Efficiency and Building Decarbonization: A Holistic Approach to a Sustainable Future // Colorado Clean Energy Fund. – Режим доступа: <https://cocleanenergyfund.com/energy-efficiency-and-building-decarbonization/>

30. How deep retrofitting buildings can mitigate climate change // World Economic Forum. – 2024. – Режим доступу: <https://www.weforum.org/stories/2024/02/deep-retrofit-buildings-carbon-emissions-climate-change/>

31. GOOD PRACTICES IN CITY ENERGY EFFICIENCY. Kiev, Ukraine // ESMAP. – Режим доступу: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/2122010124551_Kiev_Case_Study_020210edited.pdf

32. Energy Efficiency Will Be the Key to Ukraine's Postwar Recovery // The National Interest. – 2024. – Режим доступу: <https://nationalinterest.org/feature/energy-efficiency-will-be-key-ukraines-postwar-recovery-213485>

33. Rebuilding Amid Conflict. How Ukraine's Energy Efficiency Fund Adapts to War // Rubryka. – 2024. – Режим доступу: <https://rubryka.com/en/article/how-ukraine-s-energy-efficiency-fund-adapts-to-war>

34. Energy-efficient refurbishment of multi-family residential buildings // Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). – Режим доступу: <https://www.giz.de/en/worldwide/135177.html>

35. Norway has pledged EUR 16 million for rebuilding activities in Ukraine through Nefco // NEFCO. – 2024. – Режим доступу: <https://www.nefco.int/news/norway-has-pledged-eur-16-million-for-rebuilding-activities-in-ukraine-through-nefco/>

36. Ukraine presented plans for decarbonization of the energy sector at COP 28 // GMK Center. – 2023. – Режим доступу: <https://gmk.center/en/news/ukraine-presented-plans-for-decarbonization-of-the-energy-sector-at-sor-28/>

37. How wind and solar is restoring Ukraine's energy and resisting Russian missile attacks // The Christian Science Monitor. – 2024. – Режим доступу: <https://www.csmonitor.com/World/Europe/2024/1120/Ukraine-Russia-war-clean-energy-wind-and-solar>

38. Ukraine Energy Information // Enerdata. – Режим доступу: <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/ukraine/>

39. Climate Policy in Ukraine // Ukrainian Climate Office. – Режим доступу: <https://ukrainian-climate-office.org/en/climate-policy-in-ukraine/>

40. Heat Detoxification in times of War: Improving resilience in Vinnytsua // Covenant of Mayors. – 2024. – Режим доступу: <https://eu-mayors.ec.europa.eu/en/Heat-Detoxification-in-times-of-War-Improving-resilience-in-Vinnytsua>
41. Vinnytsia Oblast // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Vinnytsia_Oblast
42. Innovating Energy Planning in Ukraine // Energy Modelling Lab. – 2024. – Режим доступу: <https://energymodellinglab.com/innovating-energy-planning-in-ukraine/>
Ukraine – Efficiency and demand // International Energy Agency. – Режим доступу: <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>
43. Ukraine – Energy mix // International Energy Agency. – Режим доступу: <https://www.iea.org/countries/ukraine/energy-mix>
44. Lviv region in figures // Main Department of Statistics in Lviv Region. – Режим доступу: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/help/pb_fig2021/en/chapter_4_3.html
45. National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030 // Energy Community. – Режим доступу: https://www.energy-community.org/dam/jcr:9d144283-08ed-410b-a670-7fd15c7782f2/1_NECP_EnMachineTranslation.pdf
46. Energy infrastructure damaged in Vinnytsia region // Ukrinform. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3941695-energy-infrastructure-damaged-in-vinnytsia-region.html>
47. Over two years, Russia has carried out 25 massive attacks on Ukraine's energy sector // DiXi Group. – 2024. – Режим доступу: <https://dixigroup.org/en/over-two-years-russia-has-carried-out-25-massive-attacks-on-ukraines-energy-sector/>
48. Two simultaneous power outages introduced in ten regions and Kyiv // Ukrainian Energy. – 2024. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/en/posts/09-12-2024-49b7acd5-de0e-42bf-bb0b-7397c678edf9>
49. Planar process // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Planar_process
50. The Semiconductor Industry and the Planar Process // All About Circuits. – Режим доступу: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/designing-analog-chips/analog-devices/the-semiconductor-industry-and-the-planar-process/>

51. How are Solar Panels Made? | The Scientific Steps // Ossila. – Режим доступу: <https://www.ossila.com/pages/how-are-solar-panels-made>
52. What Is a Silicon Wafer for Solar Cells? // EcoFlow Blog. – Режим доступу: <https://blog.ecoflow.com/us/what-is-silicon-wafer-for-solar-cells/>
53. Polysilicon Production: Siemens Process // Bernreuter Research. – Режим доступу: <https://www.bernreuter.com/polysilicon/production-processes/>
54. Planar silicon transistors and diodes // Computer History Museum. – Режим доступу: <http://s3.computerhistory.org/siliconengine/hoerni-planar-paper.pdf>
55. 1959: Invention of the "Planar" Manufacturing Process // The Silicon Engine. – Режим доступу: <https://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-planar-manufacturing-process/>
56. The Czochralski Process: How WaferPro Produces High-Quality Silicon Wafers // WaferPro. – Режим доступу: <https://waferpro.com/the-czochralski-process-how-waferpro-produces-high-quality-silicon-wafers/>
57. 5 Steps For Monocrystalline Silicon Solar Cell Production // Tongwei Co., Ltd. – Режим доступу: <https://en.tongwei.cn/blog/239.html>
58. Renewable energy // UkraineInvest. – Режим доступу: <https://ukraineinvest.gov.ua/en/industries/energy/renewable-energy/>
59. Renewable energy in Ukraine // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Ukraine
60. Sydorova D. Solar Energy Production Prospects in Ukrainian Reality: A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Financial Economics . – Kyiv: Kyiv School of Economics, 2019. – Режим доступу: https://kse.ua/wp-content/uploads/2019/04/BFE_Thesis_final_Sydorova_Daryna.pdf
61. Cadmium Telluride Solar Cells // National Renewable Energy Laboratory (NREL). – Режим доступу: <https://www2.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells>
62. Cadmium telluride photovoltaics // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Cadmium_telluride_photovoltaics
63. Copper indium gallium selenide solar cell // Wikipedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_indium_gallium_selenide_solar_cell

64. How Are Perovskite Solar Cells Made? // G2V Optics. – Режим доступа: <https://g2voptics.com/perovskite-solar-cells/how-are-perovskite-solar-cells-made/>
65. Organic Photovoltaic Solar Cells // National Renewable Energy Laboratory (NREL). – Режим доступа: <https://www2.nrel.gov/pv/organic-photovoltaic-solar-cells>
66. Cadmium Telluride Solar Panels Vs. Silicon: Assessing Efficiency Trends For 2025 // Solaria Solar & Roofing. – Режим доступа: <https://solariasolarandroofing.com/cadmium-telluride-solar-panels-vs-silicon-which-is-more-efficient-in-2025/>
67. Copper Indium Gallium Diselenide // U.S. Department of Energy. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/solar/copper-indium-gallium-diselenide>
68. Perovskite Solar Cells // U.S. Department of Energy. – Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>
69. Manufacturing Processes of Solution-processed Organic Solar Cells and Recent Advances // IEOM Society. – Режим доступа: <http://www.ieomsociety.org/imeom/217.pdf>
70. Organic Solar Cells Breakthrough: 20.82% Efficiency and High Thickness Tolerance // InfinityPV. – Режим доступа: <https://www.infinitypv.com/news/organic-solar-cells-breakthrough-2082-efficiency-and-high-thickness-tolerance>
71. Which Type Of Solar Panel Should You Choose? // EnergySage. – Режим доступа: <https://www.energysage.com/solar/types-of-solar-panels/>
72. Types Of Solar Panels: Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film // SolarReviews. – Режим доступа: <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>
73. Comprehensive Guide to Monocrystalline Solar Panel // CHINT Global. – Режим доступа: <https://www.chintglobal.com/global/en/about-us/news-center/blog/monocrystalline-solar-panel.html>
74. Why are Polycrystalline Panels so Popular // Solar Facts. – Режим доступа: <https://www.solar-facts-and-advice.com/polycrystalline.html>
75. Monocrystalline Vs. Polycrystalline Solar Panels (What's Best?) // EcoWatch. – Режим доступа: <https://www.ecowatch.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline>

76. An Overview Of Thin Film Solar Panels // GreenLancer. – Режим доступа: <https://www.greenlancer.com/post/thin-film-solar-panels>

77. Thin-Film Solar Panels: What You Need To Know // EnergySage. – Режим доступа: <https://www.energysage.com/solar/types-of-thin-film-solar-panels/>

78. Photovoltaic cells convert sunlight into electricity // U.S. Energy Information Administration (EIA). – Режим доступа: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>

79. Elliptical tubes receivers' efficiency analysis in solar power towers // AIP Publishing. – Режим доступа: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2126/1/030031/701499/Elliptical-tubes-receivers-efficiency-analysis-in>

80. Design of the Elliptical window (REFOS) // ResearchGate. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/figure/Design-of-the-Elliptical-window-REFOS-14_fig2_268572989

81. Solar thermal collector // Wikipedia. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector

82. CHAPTER FOUR Solar Thermal Energy Collectors // Mustansiriyah University. – Режим доступа: https://www.uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/9/9_2018_10_28!09_31_50_PM.pdf

83. Types of Concentrated Solar Collectors and their Advantages // SolarFeeds. – Режим доступа: <https://www.solarfeeds.com/mag/concentrated-solar-collectors-types-and-their-advantages-disadvantages/>

84. The Advantages and Disadvantages of Solar Energy // Constellation. – Режим доступа: <https://www.constellation.com/energy-101/energy-innovation/solar-energy-pros-and-cons.html>

85. How to Do a Solar Site Survey? – Complete Guide // Sunbase Data. – Режим доступа: <https://www.sunbasedata.com/blog/how-to-do-solar-site-survey-complete-guide>

86. Solar System Types Compared: Grid-Tied, Off-Grid, and Hybrid // SolarReviews. – Режим доступа: <https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems>

87. PV Management: New Solar Panel Recycling // Solarnplus. – Режим доступу: <https://www.solarnplus.com/pv-management-new-solar-panel-recycling/>

88. Solar Panel Recycling: How America is Tackling the PV Waste Challenge // Moser Baer Solar. – Режим доступу: <https://www.moserbaersolar.com/sustainability-and-environmental-impact/solar-panel-recycling-how-america-is-tackling-the-pv-waste-challenge/>

89. Кушнір Д. В. Екологічна безпека сонячної генерації в контексті декарбонізації Вінницької області : курсова робота / Д. В. Кушнір ; наук. кер. Р. В. Петрук ; Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії. – Вінниця, 2024. – 29 с.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Екологічна безпека сонячної генерації в контексті декарбоназації вінницької області

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ЕХТЗД, група ТЗД -216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 4,5%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

+Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Васильківський І.В., к.т.н., доцент

Іщенко В.А., к.т.н, професор

Особа, відповідальна за перевірку

Матусяк М.В.

З висновком експертної комісії ознайомлений)

Керівник

Кушнір Д.В.

Петрук В.Г.

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**Екологічна безпека сонячної генерації в контексті декарбонізації
Вінницької області**

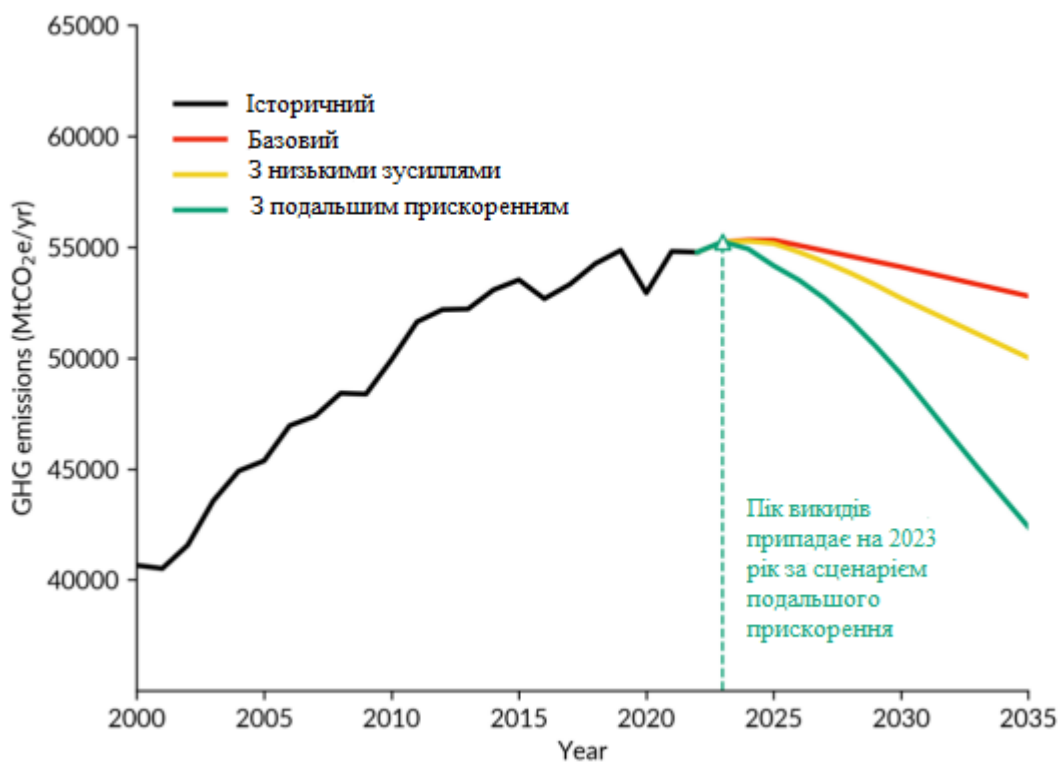


Рис Б.1 Майбутні викиди парникових газів за трьома сценаріями

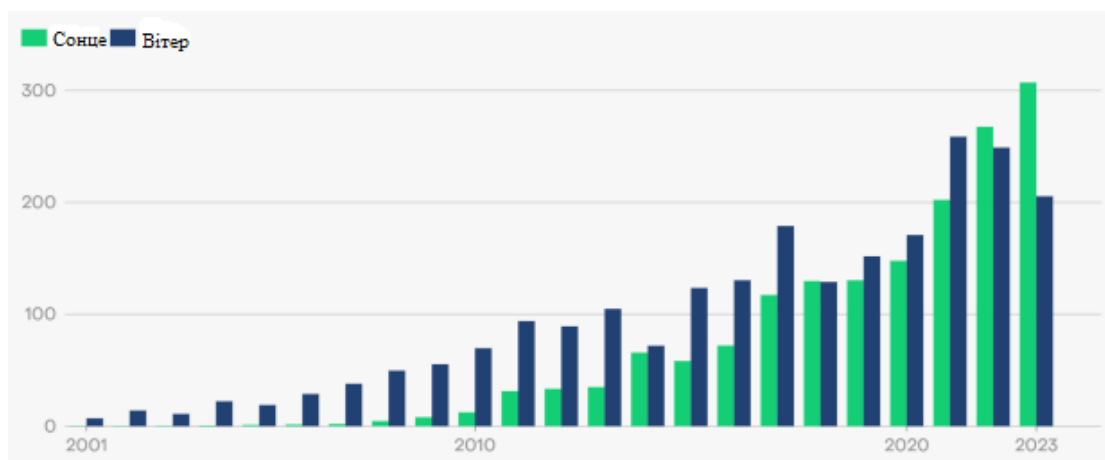


Рис Б.2 Річна зміна виробництва електроенергії (ТВт·год)

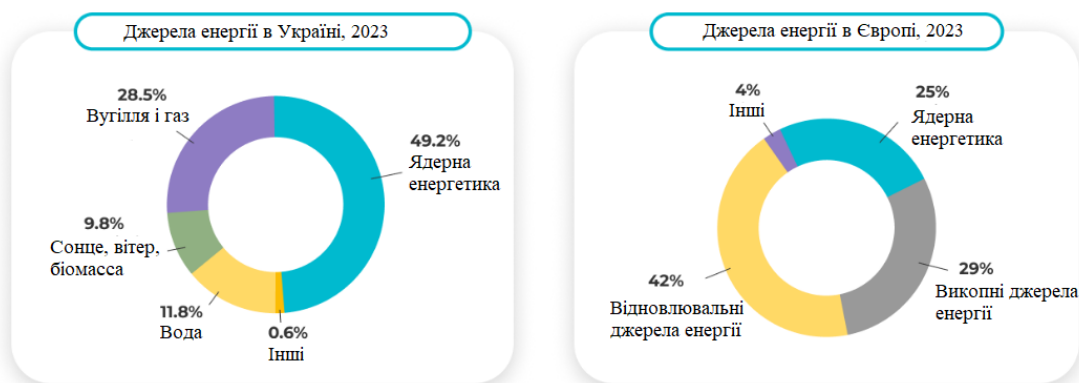


Рис Б.3 Порівняння джерел енергії в Україні та Європі станом на 2023 рік

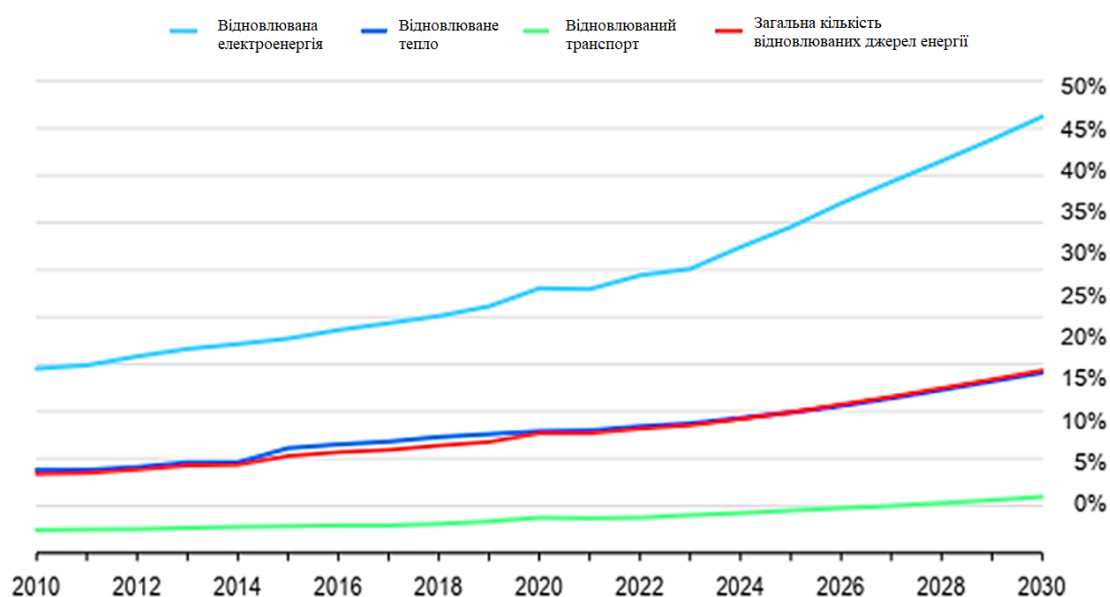


Рис Б.4 Частка відновлюваної енергії у світовому кінцевому споживанні енергії за секторами

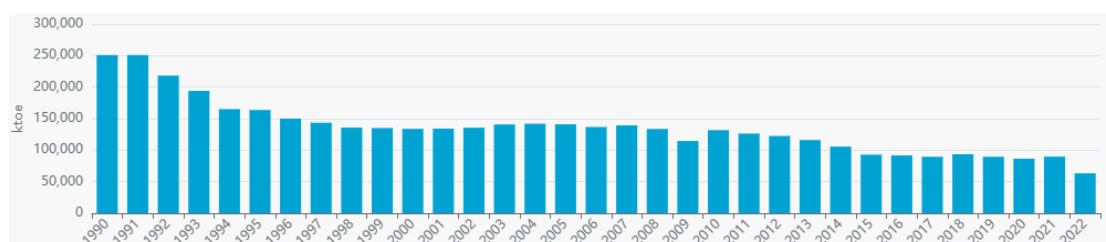


Рис Б.5 Інтерактивна діаграма загального споживання енергії в Україні

2018		2022	
Країна	Збільшення потужностей (МВт)	Країна	Збільшення потужностей (МВт)
Турція	2,588	Німеччина	3,992
Німеччина	1,760	Франція	3,240
Велика Британія	954	Турція	2,250
Франція	873	Нідерланди	1,912
Нідерланди	770	Іспанія	1,849
Італія	409	Італія	1,824
Бельгія	285	Україна	751 (4%)
Швейцарія	260	Велика Британія	587
Україна	211 (2%)	Польща	551
Австрія	170	Греція	543

Рисунок Б.6 Збільшення потужностей на 10 провідних європейських ринках сонячної енергетики у 2017 та 2022 роках

	2030	2050
Для наземних електростанцій	16	90
Для електростанцій, що встановлюються на даху	5	36

Рисунок Б.7 Потенціал сонячної енергетики в Україні, ГВт.

Назва компанії	Основні види діяльності	Очікувана встановлена потужність у Вінниці (МВт)
Ukrteplo	Розробка, експлуатація	4.2
Rengy Development	Розробка	55
KNESS Group	Розробка, Будівництво, Виробництво, Експлуатація	~93.6
Avenston	Експлуатація	5.776

Рисунок Б.8 Ключові компанії сонячної енергетики у Вінницькій області

Характеристика	Телурид кадмію (CdTe)	Селенід міді-індію-галію (CIGS)	Перовскітні сонячні елементи	Органічні сонячні елементи (OSCs)
Ефективність (комерційна)	18-22%	12-14%	Ще не комерціалізовано у великих масштабах	8-12%
Ефективність (рекордна)	23.1%	23.64%	26,7% (одинарний), 33,9% (тандемний)	19-20%
Вартість (оціночна, \$/Вт)	\$0.50 - \$1.00	\$0.60	Потенційно низька	Потенційно низька
Стабільність/Термін служби	Покращення, історично коротше	Може швидко руйнуватися	Значні проблеми з вологою, теплом, киснем, світлом	Коротший термін служби, руйнується під впливом (УФ) випромінювання, вологи, кисню
Доступність матеріалів	Телур зустрічається рідко	Індій та галій зустрічаються рідко	Проблеми токсичності свинцю	Доступні органічні матеріали
Екологічний вплив	Проблеми токсичності кадмію	Зазвичай менш шкідливий	Проблеми токсичності свинцю	Менший вуглецевий слід, потенціал для нетоксичних матеріалів
Основні застосування	Масштаб комунального підприємства	Гнучка електроніка, потенціал масштабування	Тандемні комірки, гнучка електроніка	Гнучка електроніка, портативність

Рисунок Б.9 Порівняння різних сонячних елементів