

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ
ВЗАЄМОЗАТІНЕННЯ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Грицюк М.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Куземко Н.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Грицюку Миколі Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності сонячної електростанції шляхом зменшення взаємозатінення

Керівник роботи к.т.н., доц. Куземко Н.А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року № 4/7-966.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 23.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Сонячна електростанція складається з концентраторних фотоелектричних панелей, які повертаються у напрямку Сонця системою стеження.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Системи стеження за Сонцем. Геометрія взаємного затінення

2. Алгоритм для оптимізації конфігурації розташування масивів системи КФЕ

3. Затінення

4. Схема розташування поля панелей

5. Розрахунок річного виробництва енергії

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Типи доступних систем стеження за сонцем

2. 2-осеві системи стеження за Сонцем

3. Ефект взаємного затінення

4. Алгоритм для розрахунку затінення квадратного і шахового розташування панелей

5. Середньорічний відсоток затіненої площі

6. Річне виробництво енергії

7. Коефіцієнт покриття землі

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 12.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Грицюк М.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Куземко Н.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 75 сторінок, __ аркушів презентації, 28 ілюстрацій, 8 таблиць та 33 використаних першоджерела.

Об'єкт дослідження – процес перетворення сонячного проміння у електроенергію.

Предмет дослідження – концентраторні фотоелектричні системи з двовісним стеженням за положенням сонця.

Метою кваліфікаційної роботи є: оцінити вплив затінення на двовісну систему КФЕ для відстеження сонця з урахуванням різних варіантів розміщення поля та запропонувати кращий варіант.

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу оптимізації просторового розташування двовісних концентраторних фотоелектричних (КФЕ) систем з метою мінімізації взаємного затінення та зниження нормативної вартості електроенергії (НВЕ). Розроблено обчислювальний алгоритм для моделювання взаємного затінення між панелями КФЕ систем з двовісним відстеженням Сонця. Обґрунтовано використання НВЕ як основного економічного критерію оптимізації. На основі розрахунків визначено економічно доцільні конфігурації, що забезпечують мінімізацію витрат на одиницю генерованої електроенергії. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці комплексної методики для оптимізації проектування сонячних полів КФЕ-систем, яка інтегрує математичне моделювання затінення, точне відстеження Сонця та економічну доцільність (НВЕ), і може бути використана інженерами та дослідниками для зниження інвестиційного рівня промислових сонячних електростанцій.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Галузь сонячної енергетики	10
1.2 Роль системи стеження за Сонцем	10
1.3 Системи стеження за Сонцем	12
1.3.1 Одноосьова система стеження за Сонцем	12
1.3.2 Двох-осьова система стеження за Сонцем	14
1.3.3 Обґрунтування обох систем стеження за Сонцем	16
1.3.4 Розрахунок положення Сонця	16
1.4 Загальний огляд електричних характеристик системи ФЕ/КФЕ	19
1.5 Методи/алгоритми, що використовуються дослідниками для оптимізації компонування системи КФЕ	20
1.5.1 Геометрія взаємного затінення	21
1.5.2 Метод трасування променів	22
1.5.3 Алгоритм променя/площини (чотириточковий метод).....	22
1.6 Підхід до дослідження в оптимізації великих сонячних електростанцій	23
1.7 Нормативна вартість електроенергії	24
1.8 Висновки до розділу	25
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	27
2.1 Обчислювальний алгоритм для оптимізації конфігурації розташування квадратного поля геліостатів системи КФЕ	27
2.2 Кути стеження за сонцем	30
2.3 Перетворення координат	30
2.4 Алгоритм розрахунку падіння сонячного променя	35

2.5 Особливості розрахунку нормативної вартості електроенергії	36
2.6 Схема розташування поля панелей	37
2.7 Річне виробництво енергії.....	39
2.8 Висновки до розділу	40
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	42
3.1 Затінення	42
3.2 Розрахунок річного виробництва енергії.....	46
3.3 Розрахунок нормативної вартості електроенергії.....	49
3.4 Крайовий ефект	52
3.5 Витрати, пов'язані з розташуванням на земляній поверхні	55
3.6 Коефіцієнт покриття земельної ділянки	56
3.7 Висновки до розділу	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	61
4.1 Інструктажі з охорони праці	61
4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	63
4.3 Стійкість роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної галузі.....	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ СКОРОЧЕНЬ

- A - Загальна площа сонячної панелі кожної системи КФЕ (м^2);
 A_s - Площа тіні (м^2);
 A_t - Площа тестової системи КФЕ (м^2);
 d - Швидкість деградації систем КФЕ;
 BL - Нижній лівий кут;
 BR - Нижній правий кут;
 КФЕ (CPV) - Концентратор фотоелектричної енергії;
 D_{ew} - Відстань між системами КФЕ у напрямку схід-захід (м);
 D_{ns} - Відстань між системами КФЕ у напрямку північ-південь (м);
 КВЗ - Коефіцієнт використання землі;
 i - Кількість днів;
 I_t - Початкова вартість капіталу систем КФЕ (\$);
 j - Кількість часових інтервалів на день;
 L - Розмір сонячної панелі (м);
 КПЗ (LAR) - Коефіцієнт покриття землі;
 НВЕ (LCOE) - Нормативна вартість електроенергії;
 I_{ew} - Довжина землі (м);
 I_{ns} - Ширина землі (м);
 M_t - Витрати на обслуговування систем КФЕ протягом t років (\$);
 O_t - Експлуатаційні витрати систем КФЕ протягом t років (\$);
 S_t - Річна номінальна енерговіддача систем КФЕ протягом t років
 (кВт·год);
 T - Термін експлуатації (роки);
 t_s — час.

ВСТУП

Актуальність теми. Використання систем стеження за сонцем у концентраторних фотоелектричних (КФЕ) системах сьогодні є надзвичайно актуальним, оскільки саме ці системи визначають реальну ефективність усієї установки. Концентраторні технології працюють за принципом фокусування сонячного випромінювання за допомогою лінз або дзеркал на невеликі високоефективні фотоелементні приймачі. Такі приймачі можуть перетворювати світло на електроенергію з дуже високим коефіцієнтом корисної дії, але вони вимагають точного наведення на сонце. Якщо промінь світла хоча б трохи відхиляється від осі концентратора, енергія розсіюється, фокус зміщується, і на фотоприймач потрапляє в рази менше випромінювання. Це означає, що звичайний нерухомий монтаж, як у традиційних сонячних панелей, для КФЕ-технологій практично непридатний.

Саме тому системи стеження за сонцем, які забезпечують точне позиціонування модулів протягом усього світлового дня, є обов'язковою складовою таких установок. Вони дозволяють тримати концентратор зорієнтованим перпендикулярно до сонячних променів від ранку і до вечора, коригуючи положення навіть при незначних змінах кута. Це дає змогу максимально використати пряме сонячне випромінювання — головний ресурс, на який розраховані концентраторні фотосистеми. На відміну від кремнієвих панелей, які можуть працювати і з розсіяним світлом, концентратори майже повністю «байдужі» до дифузної складової, тому точність стеження є критично важливою.

Окремою причиною актуальності таких систем є економічний аспект. Концентраторні фотоелектричні елементи виготовлені з дорогих багатошарових матеріалів, які забезпечують високий ККД, але мають невелику площу. Система концентрації світла дозволяє зменшити їх кількість і, відповідно, знизити вартість установки, проте вона працює ефективно лише тоді, коли сонячне світло потрапляє точно в фокус. Якщо встановити КФЕ

модулі без трекера, їхня продуктивність упаде настільки, що економічні переваги над звичайними панелями зникнуть. Тому трекер у цьому випадку не просто допоміжний елемент, а основа економічної доцільності всієї системи.

У сучасних умовах актуальність систем стеження зростає ще й завдяки технічному прогресу. Сьогодні такі механізми стали дешевшими, надійнішими та більш точними, ніж раніше. Вони використовують електронні контролери, датчики інсоляції, астрономічні алгоритми або GPS-навігацію для забезпечення ідеального наведеного положення. Завдяки цьому КФЕ системи можуть працювати стабільно впродовж багатьох років, забезпечуючи високу продуктивність та низьку вартість генерованої електроенергії. У регіонах із високим рівнем прямої сонячної радіації — наприклад, у південних областях України — такі установки можуть показувати значно кращі результати, ніж традиційні сонячні панелі, що робить їх використання ще більш перспективним.

Отже, актуальність застосування систем стеження за сонцем у концентраторних фотоелектричних системах полягає в тому, що вони забезпечують максимальне використання сонячної енергії, дозволяють реалізувати високий потенціал дорогих фотоелементів, підвищують загальну ефективність і роблять технологію економічно виправданою. Без трекера КФЕ панелі не можуть працювати на повну потужність, а з ним — стають однією з найефективніших сучасних технологій сонячної генерації.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: оцінити вплив затінення на двовісну систему КФЕ для відстеження сонця з урахуванням різних варіантів розміщення поля та запропонувати кращий варіант.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розроблено алгоритм для моделювання взаємного затінення між панелями КФЕ систем з двовісним відстеженням положення Сонця.
2. Визначити економічно доцільні конфігурації розташування панелей, що забезпечують мінімізацію витрат на одиницю генерованої електроенергії.

3. Визначити вплив ключових економічних та геометричних факторів на оптимізацію розташування панелей.

Об'єкт дослідження – процес перетворення сонячного проміння у електроенергію.

Предмет дослідження – концентраторні фотоелектричні системи з двовісним стеженням за положенням сонця.

Наукова новизна отриманих результатів.

У роботі встановлено залежності між геометричними параметрами розміщення трекерів та рівнем взаємозатінення. Вперше визначено оптимальні відстані для досліджуваної компоновки із двоосьовими трекерами, що забезпечують мінімальні втрати від затінення при одночасному раціональному використанні земельної площі.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у удосконаленні методики для оптимізації проєктування сонячних полів КФЕ-систем, яка поєднує математичне моделювання затінення, точне відстеження Сонця та економічну доцільність (HBE), і може бути використана інженерами та дослідниками для зниження інвестицій при будівництві промислових сонячних електростанцій.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на міжнародній науково-практичній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 28-29 травня 2025 року [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (33 найменування).

Загальний обсяг текстової частини – 76 сторінок, 8 таблиць, 27 рисунків.

Робота оформлена відповідно до методичних рекомендацій [2].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Галузь сонячної енергетики

Проблеми глобального потепління викликають все більшу занепокоєність щодо пошуку інших можливих джерел енергії, тобто безпечних, чистих та відновлюваних [3]. Зростаючий інтерес до фотоелектричних та концентраторних фотоелектричних (КФЕ) систем викликаний винаходом сонячних елементів та їх постійним розвитком у напрямку підвищення ефективності. Перетворення сонячної енергії в електричну енергію можна здійснити за допомогою фотоелектричної системи [4-10], оскільки це один із природних ресурсів, який є чистим, відновлюваним і доступним у більшості частин світу. В галузі сонячної енергетики одним з важливих параметрів для визначення ефективності великої сонячної електростанції з точки зору витрат є нормативна вартість електроенергії (НВЕ). НВЕ визначається як вартість одиниці енергії, виробленої протягом усього терміну експлуатації системи. НВЕ необхідно знизити з метою впровадження сонячної енергії як основного джерела електроенергії в найближчому майбутньому. Одним із планів зниження НВЕ є збільшення потужності, що генерується системою ФЕ/КФЕ.

1.2 Роль системи стеження за Сонцем

Розглянемо дослідження деяких доступних типів систем стеження за сонцем у світі, а також важливі основні параметри, необхідні для обчислення положення Сонця перед застосуванням відповідних значень у загальній формулі стеження за сонцем (GF) для визначення висоти Сонця та азимутального кута. Такий огляд літератури з цього питання був необхідний як базова інформація для впровадження в коди для моделювання цього дослідження.

Технологія сонячної енергії є частиною популярної технології відновлюваної енергії, оскільки вона має потенціал для виробництва

електричної енергії і водночас є екологічно чистою та надійною. Вона може добре працювати при дуже низьких витратах на обслуговування і має мінімальний вплив на екологічну систему. Існує безліч технологій сонячної енергетики, що використовуються для застосування сонячної енергії, наприклад, сонячна фотоелектрична та сонячна технологія нагрівання води [11].

Система стеження за сонцем буде головним фактором зростання виробництва енергії сонячних енергоустановках [12,13]. Фіксовані сонячні панелі без системи сонячного стеження не можуть забезпечити максимальну енергію. Тому дослідження системи сонячного стеження є необхідним для підвищення ефективності перетворення сонячних панелей з метою отримання максимальної потужності. Ця система працює завдяки частому регулюванню орієнтації сонячних панелей у напрямку до Сонця під оптимальним кутом [13].

Якісна система стеження за сонцем повинна мати високу надійність і здатність точно визначати положення Сонця в будь-який момент часу, навіть якщо іноді виникають непередбачувані перешкоди, які можуть блокувати частину сонячного світла. Сьогодні надзвичайно важливо відстежувати положення сонця якомога точніше, щоб отримати максимальну потужність від сонячної панелі. Тому була введена і виведена загальна формула відстеження сонця (GF), щоб система стеження за сонцем могла ефективно функціонувати [14].

Універсальний контролер стеження за сонцем для одно- або двоосового сонячного трекара може бути розроблений для точного визначення та регулювання кутів сонячної панелі шляхом застосування відстеження сонця в системі. Відстеження сонця може дати загальне математичне уявлення для обчислення положення сонця, яке можна легко змоделювати за допомогою Microsoft Excel. Крім того, вона допомагає підвищити точність системи стеження за сонцем шляхом компенсації помилки установки сонячної панелі. Це можна зробити без особливих труднощів, змінивши значення трьох

основних параметрів у GF [14]. Це, безсумнівно, один з найкращих методів для досягнення виняткового підвищення точності стеження за сонцем.

1.3 Системи стеження за Сонцем

Для початку розглянемо різні типи систем стеження за сонцем, що існують у світі. Системи стеження за сонцем поділяються на дві групи [12]: одноосьові (1 вісь) системи стеження за сонцем та двохосьові (2 осі) системи стеження за сонцем. На рисунку 1.1 представлені типи систем стеження за сонцем, що існують у світі.

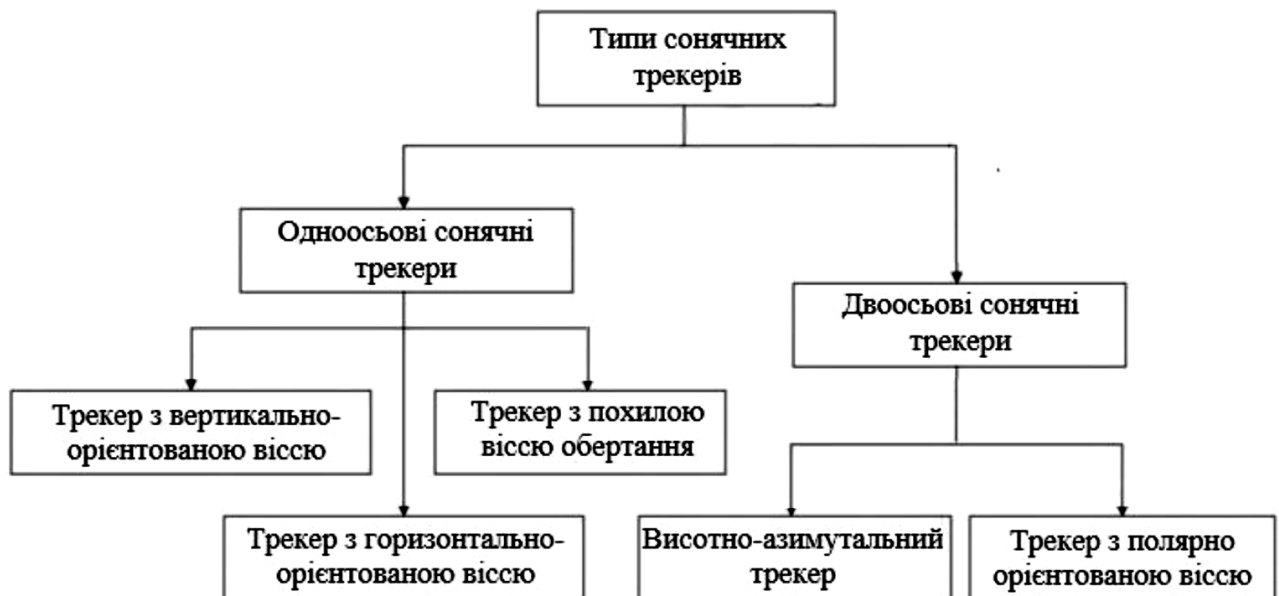


Рисунок 1.1 - Типи доступних систем стеження за сонцем

1.3.1 Одноосьова система стеження за Сонцем

Одноосьові системи стеження за сонцем в основному обертаються навколо однієї осі, слідуючи за рухом сонця в одному напрямку, тобто з півночі на південь або зі сходу на захід [13]. Загалом, кожен тип одноосьової системи стеження за сонцем має такі основні характеристики, як зазначено в таблиці 1.1. Крім того, приклади одноосьових систем стеження за сонцем наведено на рисунках 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.1 - Основні характеристики кожного типу одноосьової системи стеження за сонцем

Одноосьова система стеження за сонцем	Основні характеристики
Система стеження за сонцем з горизонтальною віссю	– Вісь стеження за сонцем вирівняна з земною поверхнею. Вона може бути розміщена вздовж напрямку Північ-Південь (NS) або Схід-Захід (EW). – Зазвичай її використовують для районів поблизу екватора, де положення сонця опівдні є найвищим
Система стеження за сонцем з нахиленою віссю	– Вісь стеження за сонцем нахилена, тобто не є ні вертикальною, ні горизонтальною. – Основна перевага цього типу систем стеження за сонцем полягає в тому, що вони можуть бути щільно розміщені на обмеженій площі. – Ця конкретна система майже досягає продуктивності 2-осьової системи стеження за сонцем
Система стеження за сонцем з вертикальною віссю	- Вісь стеження за сонцем вирівняна з віссю зеніту. - Найбільш відома як азимутальна система стеження за сонцем. - Цей тип системи стеження за сонцем зазвичай використовується в місцях з високою широтою, оскільки положення сонця не піднімається так високо опівдні

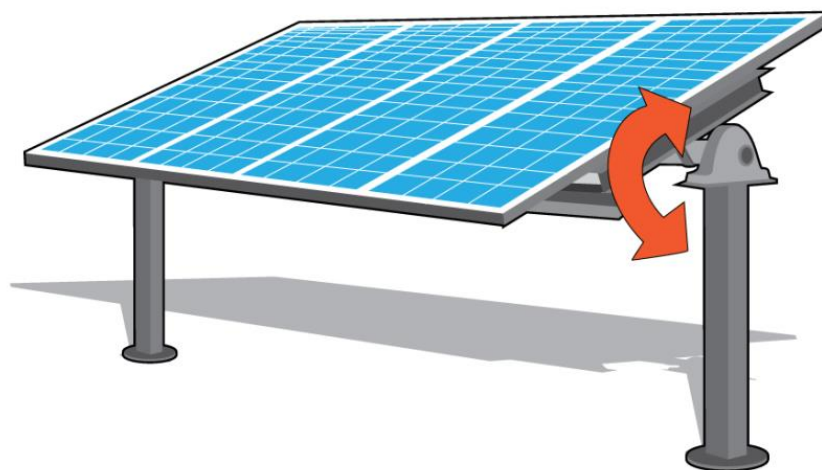


Рисунок 1.2 - Застосування одноосьової системи стеження за сонцем для сонячної фотоелектричної панелі



Рисунок 1.3 - Застосування одноосової системи стеження за сонцем для сонячної теплової параболічної труби

1.3.2 Двох-осьова система стеження за Сонцем

Максимальна ефективність збору енергії може бути досягнута за допомогою 2-осової системи стеження за сонцем, яка відстежує рух сонця як по вертикалі, так і по горизонталі [13]. Типові приклади 2-осової системи стеження за сонцем та її основні характеристики наведені в таблиці 1.2. Приклади 2-осових систем стеження за сонцем також наведені на рисунках 1.4 та 1.5 .

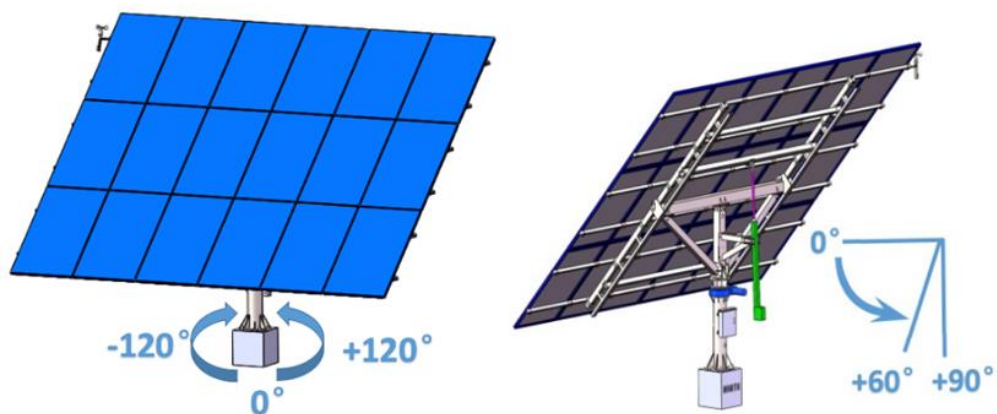


Рисунок 1.4 - Застосування 2-осової системи стеження за Сонцем для сонячної фотоелектричної панелі

Таблиця 1.2 - Основні характеристики кожного типу двохосьової системи стеження за сонцем

1-осьова система стеження за сонцем	Основні характеристики
Азимутно-висотна система стеження за сонцем	– Ця система повинна мати можливість вільно обертатися навколо осей азимута і висоти. – Азимутальна вісь системи стеження за сонцем повинна бути вирівняна з віссю зеніту. – Вісь висоти повинна знаходитися під кутом 90 градусів до осі азимута. Вона також вирівнюється до поверхні землі. – Застосовується для великих і важких сонячних панелей
Полярна система з нахилом і поворотом	– Основна робота цієї системи полягає в тому, що вона змінює кут нахилу в залежності від руху сонця. – Крім того, вона також щоденно слідкує за рухом сонця зі сходу на захід. – Однією з особливостей полярної системи є те, що одна з осей розміщена відповідно до полярної осі нашої Землі, яка спрямована прямо на Полярну зірку. – Тому сонячна панель цієї системи непрямо нахилена, а кут нахилу дорівнює куту широти конкретного місця .



Рисунок 1.5 - Застосування двохосьової системи стеження за Сонцем для сонячної теплової тарілки

1.3.3 Обґрунтування обох систем стеження за Сонцем

Двохосьової системи стеження за сонцем використовують рух як по осі висоти, так і по осі азимута. Цей тип системи стеження за сонцем фактично забезпечує найкращі показники, оскільки, на відміну від 1-осьової системи стеження за сонцем, вона точно відстежує рух сонця. Тому подальше порівняння обох систем стеження за сонцем наведено в таблиці 1.3. На основі порівняння можна зробити висновок, що кожен тип системи стеження за сонцем має свої переваги та недоліки. Однак кожен тип може бути кращим за інший для різних типів застосування сонячної енергії.

Таблиця 1.3 - Порівняння обох систем стеження за сонцем

Компоненти	1-осьова система стеження за сонцем	2-осьова система стеження за сонцем
Вартість	Низька	Висока
Надійність	Висока	Низька
Термін служби	Довгий	Короткий
Вихід енергії в сонячні дні	Низька	Висока
Гнучкість	Низька	Висока
Точність	Низька	Висока
Складність	Проста	Складна

1.3.4 Розрахунок положення Сонця

Згідно з [12], ми можемо приблизно обчислити положення Сонця відносно сонячної панелі. У своїх дослідженнях вони навели прості рівняння, які допомагають оцінити відповідне положення Сонця та сонячних панелей на основі фіксованих місць розташування та умов. Перед застосуванням у GF для розрахунку необхідні такі основні параметри, як кут схилення, рівняння часу, місцевий час та годинний кут.

Кут схилення, δ , добре відомий як кут, що вимірюється від лінії до Сонця до екваторіальної площини Землі. На основі рисунка 1.1 можна побачити, що кут схилення змінюється протягом року. Для обчислення кута схилення застосовується наступне рівняння.

$$\delta = \sin^{-1} \{0,39795 \cos[0,98563(N-1)]\} \quad (1.1)$$

де δ - кут схилення;

N – порядковий номер дня року.

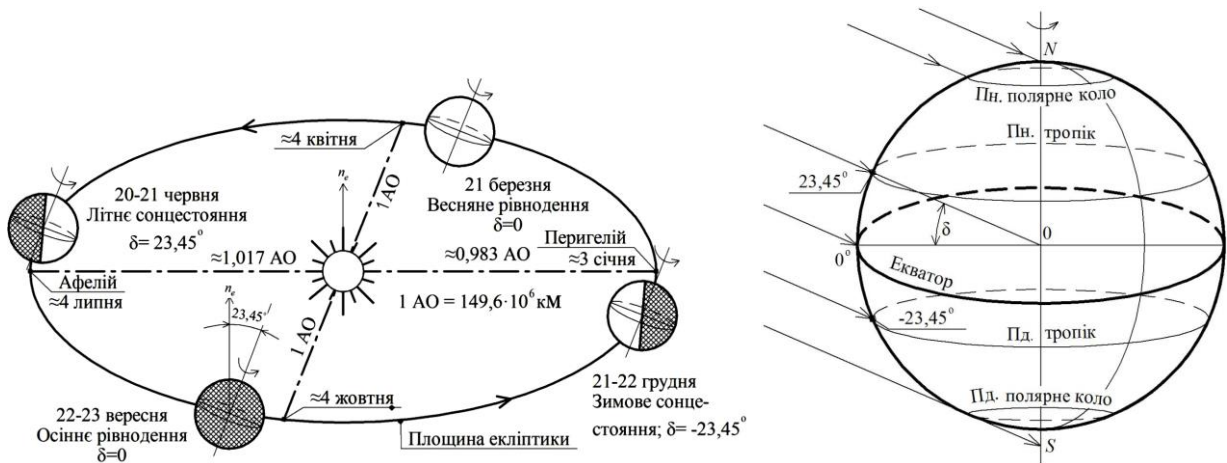


Рисунок 1.6 - Зміни кута схилення протягом року

Для обчислення рівняння часу (EOT), згаданого застосовуються рівняння 1.2 і 1.3.

$$EOT = 0,258 \cos x - 7,416 \sin x - 3,648 \cos 2x - 9,228 \sin 2x \quad (1.2)$$

де x – функція дня, N

$$x = \frac{360(N-1)}{365,242} \quad (1.3)$$

Місцевий час (LCT) представляє час у конкретному місці. Зазвичай місцевий час можна використовувати для обчислення сонячного часу конкретного місця. Сонячний час в основному виражається в 24 годинах, де 12:00 є точкою, в якій сонце досягає найвищої позиції на небі. Сонячний час варіюється залежно від довготи конкретного місця. Використовуються такі рівняння:

$$LCT = t_s - \frac{EOT}{60} + LC + D \quad (1.3a)$$

де

$$LC = \frac{\text{Довгота стандартного часового поясу} - \text{місцева довгота}}{15} \quad (1.4)$$

D - літній час у годинах (якщо діє, D=1, інакше D=0).

Годинний кут, ω , в основному описує різницю між часом поточного дня та його сонячним полуднем. Значення годинного кута дорівнює 0 градусам у сонячний полудень і збільшується або зменшується на 15 градусів щогодини відповідно до часу доби. Годинний кут можна обчислити за допомогою наступного рівняння [12]:

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (1.5)$$

де t_s - сонячний час у годинах.

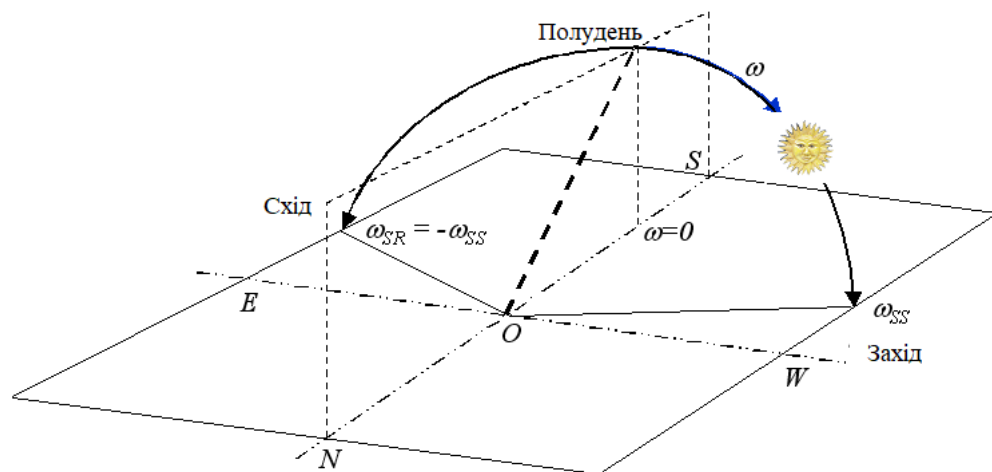


Рисунок 1.7 - Зміни годинного кута протягом дня

У попередній частині розділу згадувалося, що GF може допомогти підвищити точність будь-якого типу системи стеження за сонцем, як 1-осьової (наприклад, полярної системи стеження за сонцем), так і 2-осьової (наприклад, системи стеження за сонцем з азимутом і висотою). Згідно з [14], розрахунки або обчислення положення Сонця можна виконати, встановивши 3 важливі параметри та застосувавши відповідні значення до відповідних рівнянь,

виведених ними. Ці знання, отримані з цієї статті, були застосовані в основних розрахунках даного дослідження.

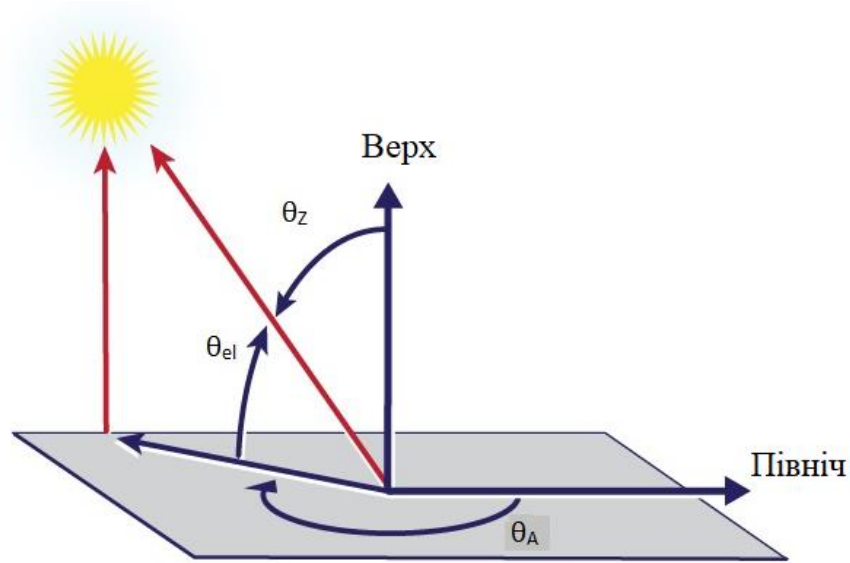


Рисунок 1.8 - Положення кута висоти, α , та кута азимута, β

1.4 Загальний огляд електричних характеристик системи ФЕ/КФЕ

З метою підвищення загальних електричних характеристик систем ФЕ/КФЕ вчені та дослідники вивчали системи стеження за сонцем різними способами. Згідно з [13], виробництво електроенергії одноосьовою системою ФЕ збільшиться на 24,5% порівняно з фіксованою системою ФЕ. В Йорданії Абдалла провів загальне дослідження виробництва електроенергії різними категоріями фотоелектричних систем [15]. Він зазначив, що виробництво електроенергії двовісною фотоелектричною системою з відстеженням сонця було на 43,87% вищим, ніж у стаціонарної фотоелектричної системи, яка мала нахил 32° на південь. Згідно з доповіддю Гомеса-Гіля та ін. [16], виробництво енергії для 1 осі на 22,3% більше в річному аналізі виробництва енергії, ніж у фіксованій плоскій системі, тоді як 2-осьові системи з плоскою панеллю мають на 25,2% більше, ніж фіксовані плоскі системи. На основі вищезазначених досліджень було зроблено висновок, що система стеження за сонцем ФЕ має значно кращі електричні характеристики, ніж система ФЕ з фіксованим кріпленням.

У 2012 році Чонг і Тан [17] дослідили оптичні втрати в полі геліостатів у своєму тематичному дослідженні, враховуючи втрати, наприклад, ефект затінення, спричинений конфігурацією поля. Однак не було проведено жодних досліджень оптичних втрат у полі двовісної фотоелектричної системи з сонячним стеженням. У процесі інтеграції з національною електромережею затінення між полями геліостатів фотоелектричних/концентрованих фотоелектричних модулів зменшить виробництво електричної енергії, оскільки між сонячними елементами виникне невідповідність струму. Взаємне затінення можна зменшити, збільшивши відстань між сусідніми панелями фотоелектричних/концентрованих фотоелектричних модулів. Однак цей метод вимагає більшої площі землі, що призводить до збільшення витрат, пов'язаних із землею. Витрати на землю можуть входити до щорічних витрат на експлуатацію та обслуговування або до початкових інвестицій, залежно від права власності на землю. Проте це значно збільшує середню вартість електроенергії (НВЕ), особливо якщо мова йде про сонячну електростанцію промислового масштабу, яка займає великі площі землі. У деяких країнах земля є дефіцитним ресурсом і безцінним активом для нації. Тому її не можна марнувати за жодних обставин.

1.5 Методи/алгоритми, що використовуються дослідниками для оптимізації компонування системи КФЕ

Оптичні втрати, що виникають через взаємне затінення між системами КФЕ внаслідок невідповідного компонування систем КФЕ на сонячній електростанції, відповідно зменшують виробництво електроенергії. Існує ряд методів, які використовуються дослідниками для мінімізації ефекту взаємного затінення.

1.5.1 Геометрія взаємного затінення

У 2012 році Перпінан [18] змодельював конфігурацію квадратного поля геліостатів двовісної системи стеження за сонцем, використовуючи геометрію взаємного затінення, як показано на рисунках 1.9 і 1.10. Цей тригонометричний метод застосовується для визначення мінімальної відстані розділення з метою отримання нульового затінення. Інші автори також використовували тригонометричний метод для обчислення мінімальної відстані між сусідніми прямокутними системами стеження північ-південь і схід-захід для конфігурації квадратного поля геліостатів. Цей метод є менш бажаним, оскільки його можна використовувати лише за умов нульового затінення, що призведе до збільшення площі використання землі.

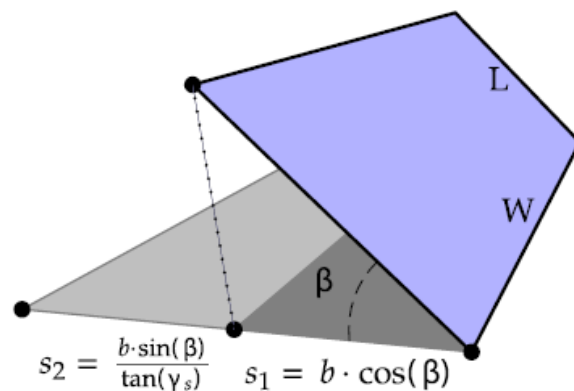


Рисунок 1.9 - Розміри 2-осьового трекера та довжина його тіні.

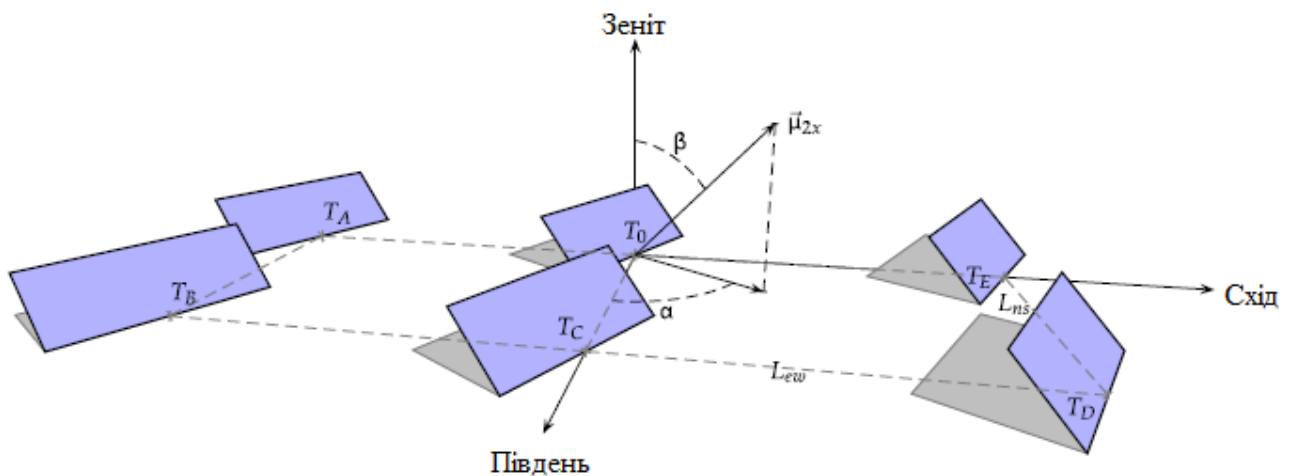


Рисунок 1.10 - Ефект взаємного затінення між шістьма 2 системами стеження за сонцем.

1.5.2 Метод трасування променів

Існує ще один метод, запропонований Фартарією та Перейрою [19], а саме метод трасування променів, який також відомий як метод «точка-точка». Цей метод допомагає визначити втрати, що виникли через затінення для прямого нормального випромінювання (DNI) як у квадратному, так і в шахматному розташуванні сонячних дзеркал.

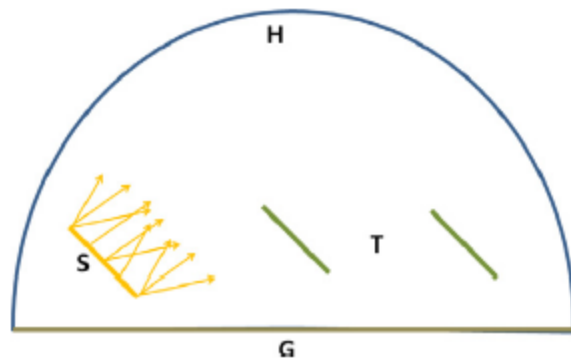


Рисунок 1.11 - Метод трасування променів для втрат через затінення, де Н — горизонт (представлений сферою), G — земля, S — ізотропне прямокутне джерело, а Т — система стеження за сонцем, яка затінює джерело.

Використовуючи метод трасування променів приймають два таких припущення, а саме: сонячні промені паралельні, а відстеження Сонця є ідеальним. Це припущення було зроблено з метою визначення ефективності затінення сонячного поля щодо коефіцієнта покриття землі (КПЗ). У їхньому дослідженні припускається, що вся панель повністю затінена, якщо затінена її центральна точка. Однак цей метод вимагає тривалого обчислювального часу, хоча результати є точними.

1.5.3 Алгоритм променя/площини (чотириточковий метод)

Для значного скорочення часу обчислення методом трасування променів можна використовувати спеціальний алгоритм. Цей алгоритм використовує алгоритм променя/площини (чотириточковий метод), розроблений Чонгом і

Таном [17]. У їхньому дослідженні цей алгоритм використовувався для визначення впливу затінення та блокування для поля геліостатів у системі центральної вежі. У цьому дослідженні припускається, що траєкторія сонячного світла є прямою. Час обчислення скорочується, але дослідження базується лише на полі геліостатів.

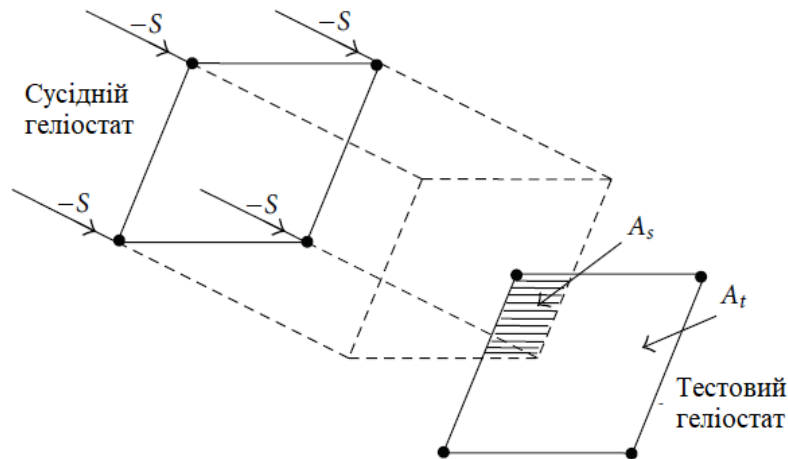


Рисунок 1.12 - Ефект затінення на «Тестовому геліостаті»

1.6 Підхід до дослідження в оптимізації великих сонячних електростанцій

Існують різні способи, за допомогою яких дослідники оптимізують продуктивність великих сонячних електростанцій. Дослідники зазвичай враховують такі фактори, як комбінації компонування співвідношення сторін, зміщення та КВЗ покриття землі при оптимізації положення сонячної панелі. Однак жоден з них не враховував «ефекти краю» у своїх дослідженнях.

У 2014 році такі фактори, як комбінації компонування пропорцій, зміщення та коефіцієнт покриття землі при оптимізації положення сонячних панелей, були враховані в дослідженні, проведеному Кампстоном і Паєм [20] з метою зменшення річного затінення для діапазону щільності сонячних панелей у їхньому дослідженні в Барстоу, Каліфорнія. Вони також припустили, що всі сусідні ділянки затінені. Тому в їхньому дослідженні не проводилося моделювання «ефектів країв» поля геліостатів. На основі дослідження, вони зазначили, що «ефект краю» можна не враховувати в квадратних або майже

квадратних конфігураціях поля геліостатів, за умови, що конфігурації мають більше 50 панелей.

Багато інших дослідницьких груп не враховували цей «ефект краю» або межі у своїх дослідженнях. У 2017 році дослідники передбачили, що оптичні характеристики сонячного поля можна оптимізувати з точки зору ефективності затінення та коефіцієнта покриття землі. Крім того, вони також зазначили, що «ефект краю» виключений з їхнього дослідження, оскільки вважається, що цей ефект стає менш важливим із збільшенням розміру поля.

1.7 Нормативна вартість електроенергії (НВЕ)

Нормативна вартість електроенергії (НВЕ) завжди був одним з основних способів оцінки економічної доцільності фотоелектричних проєктів, коли технології сонячної енергії стають більш зрілими та конкурентоспроможними. Це дозволяє порівняти їх з витратами інших технологій на електростанціях. НВЕ є параметром оцінки економічного аспекту електростанції. Згідно з попередніми роботами інших дослідників, оптимізація проєктування поля фотоелектричних систем можлива лише з урахуванням продуктивності системи шляхом зменшення або усунення взаємного затінення в фотоелектричній системі. НВЕ сонячних фотоелектричних систем має бути значно зменшена, щоб залучити потенційних інвесторів до інвестування в сонячні електростанції, але на даний момент ще не існує досліджень щодо оптимізації НВЕ поля КФЕ з використанням фактичних метеорологічних даних.

У цій кваліфікаційній роботі пропонується новий обчислювальний алгоритм для оптимізації НВЕ проєктування поля відповідно до місцевих метеорологічних даних. Важливо зменшити взаємне затінення шляхом збільшення відстані між сусідніми системами КФЕ на полі, але ця ідея призводить до більшого використання земельної площі, що, в свою чергу, призводить до збільшення витрат, пов'язаних із землею. Відстань між сусідніми системами КФЕ є компромісом між використанням землі та продуктивністю, де

надзвичайно важливо оптимізувати економічний баланс між вартістю землі та обсягом виробленої електроенергії.

1.8 Висновки до розділу

1. У ході дослідження було встановлено, що розвиток сонячної енергетики тісно пов'язаний із підвищенням ефективності перетворення сонячної енергії та зменшенням нормативної вартості електроенергії (НВЕ). Одним із ключових способів досягнення цих цілей є застосування систем стеження за Сонцем, які забезпечують суттєве збільшення виробництва електроенергії порівняно зі стаціонарними фотоелектричними установками.

2. Проаналізовано основні типи сонячних трекерів — одноосьові та двоосьові. Одноосьові системи відзначаються простотою, надійністю та меншими витратами, тоді як двоосьові забезпечують найвищий рівень відстеження та максимальний вихід енергії, але є складнішими й дорожчими. Порівняння показало, що вибір системи залежить від конкретних умов експлуатації, вартості землі, широти місцевості та вимог до продуктивності.

3. Розглянуті методи визначення положення Сонця та використання загальної формули стеження (GF) доводять, що точність орієнтації сонячних панелей може бути значно підвищена за рахунок математичного моделювання. Це забезпечує покращення роботи будь-якого типу трекера — як одноосьового, так і двоосьового.

4. Особливу увагу приділено проблемі взаємного затінення між фотоелектричними/концентраторними модулями. Різні підходи до його мінімізації — геометричні методи, трасування променів та алгоритми променя/площини — дозволяють оптимізувати компоновку великих сонячних полів, проте часто потребують компромісу між відстанню між трекерами та використанням земельної площі. Це безпосередньо впливає на НВЕ, що робить економічну оптимізацію розташування систем ключовим завданням.

5. Загалом, проведений огляд підтвердив, що оптимізація сонячних електростанцій є комплексним процесом, який охоплює технічні, математичні та економічні аспекти. Для зниження НВЕ та підвищення конкурентоспроможності сонячної енергетики вкрай важливо враховувати місцеві метеорологічні умови, раціональне компонування поля, точність стеження та баланс між продуктивністю й витратами на землю. Застосування розроблених алгоритмів розрахунку та оптимізації може забезпечити максимально ефективне використання сонячних трекерів як у малих, так і у великомасштабних проектах.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Обчислювальний алгоритм для оптимізації конфігурації розташування квадратного поля геліостатів системи КФЕ

Алгоритм для оптимізації конфігурації розташування поля геліостатів було розроблено (рис.2.1) та реалізовано за допомогою платформи моделювання MATLAB. Алгоритм цього моделювання може бути змодельований для двох різних типів конфігурацій розміщення фотоелектричних модулів на сонячних електростанціях, тобто квадратних та шахових, враховуючи щорічні місцеві метеорологічні дані, співвідношення сторін землі, краєвий ефект та відстань між сусідніми фотоелектричними системами. Методологія алгоритму моделювання для оптимізації конфігурацій квадратного та шахового розташування сонячних панелей детально показана на рисунку 2.1 та рисунку 2.2 відповідно. Дані алгоритми спеціально призначені для аналізу та оптимізації двохосової системи відстеження сонця для сонячних електростанцій шляхом виконання наступних дій: (а) обчислення річного ефекту затінення та річного виробництва енергії для різних конфігурацій розташування, (б) оптимізація НВЕ для обох конфігурацій розташування. Відносно розташування сусідніх систем КФЕ на сонячній електростанції змінюється для обчислення оптимізації конфігурації розташування полів. У цьому дослідженні чітко простежується компроміс між використанням землі та продуктивністю. Таким чином, дослідження економічного балансу між вартістю землі та вартістю виробництва електроенергії проводиться з використанням результатів моделювання.

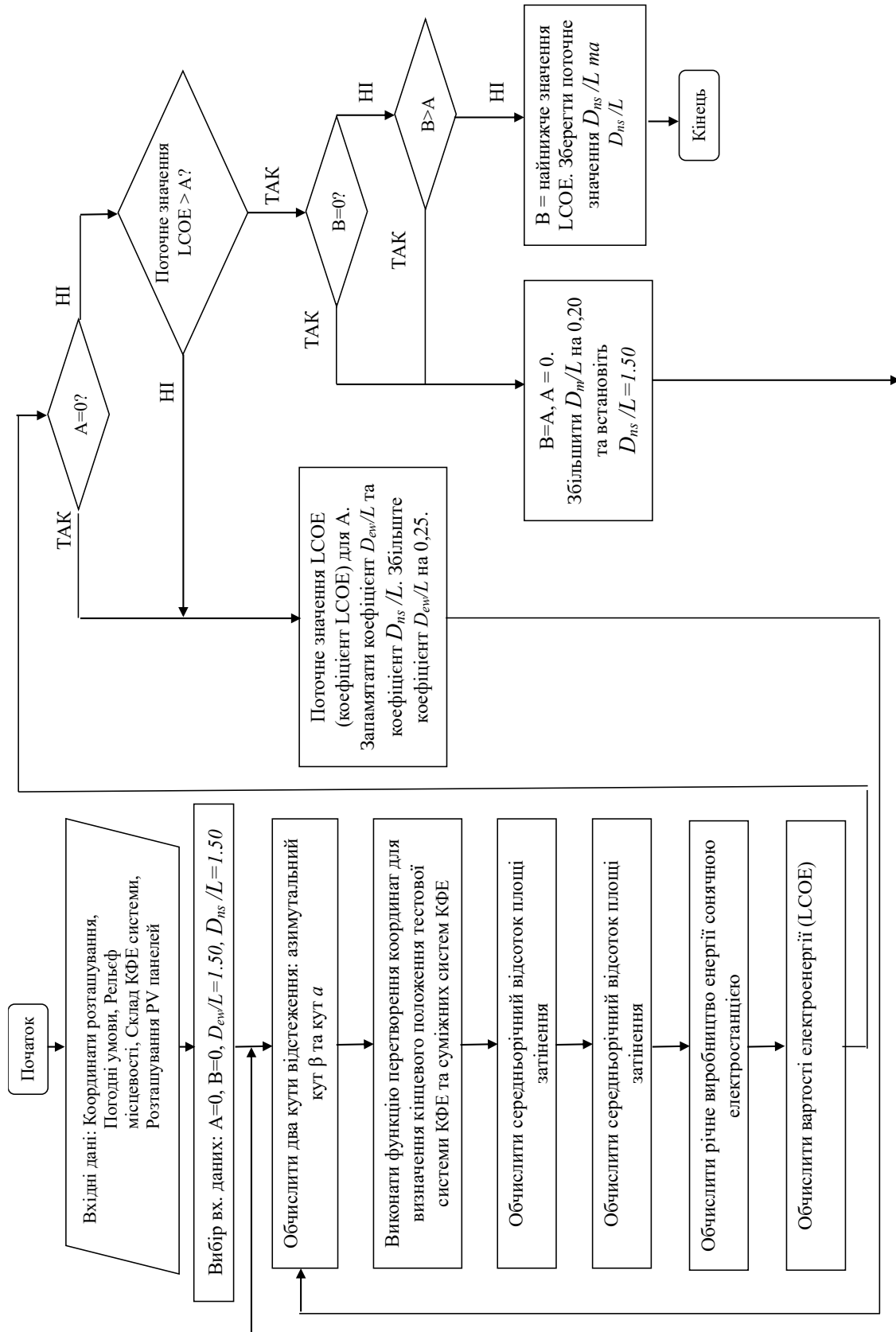


Рисунок 2.1 - Алгоритм для оптимізації конфігурації розташування квадратного поля геліостатів

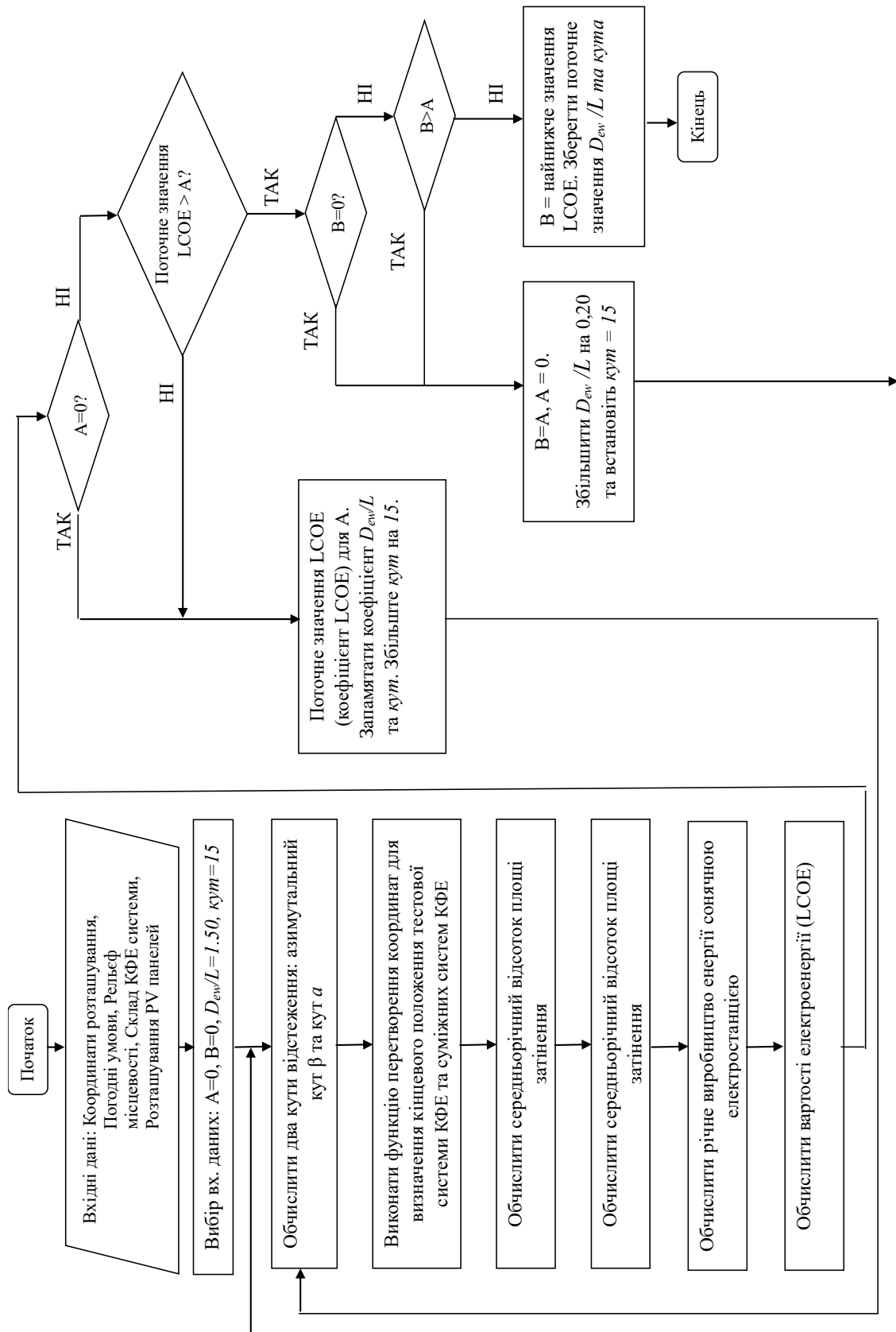


Рисунок 2.2 - Алгоритм для оптимізації конфігурації шахового розташування поля геліостатів для поля ФЕМ в платформі моделювання MATLAB

2.2 Кути стеження за сонцем

Двовісний механізм стеження за сонцем важливий для точного відстеження положення сонця і отримання максимально можливого перетворення енергії для системи КФЕ, оскільки положення сонця відповідно змінюється протягом дня і року. У цьому дослідженні пропонується найбільш поширений метод стеження за сонцем. Чонг і Вонг [14] зазначають, що два кути стеження за сонцем методу азимутально-висотного стеження за сонцем, тобто кут висоти α і кут азимуту β , можуть бути отримані із загальної формули стеження за сонцем (GF) шляхом встановлення трьох кутів орієнтації сонячної панелі на нуль, як це виражено в наступних рівняннях:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \omega \cos \phi), \quad (2.1)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \cos \omega \sin \phi}{\cos \alpha}\right), \quad (2.2)$$

де δ - кут схилення сонця;

ω - годинний кут;

ϕ - широта.

Якщо $\sin \omega > 0$, то $\beta = 2\pi - \beta$.

2.3 Перетворення координат

Метод перетворення координат використовується в цьому дослідженні для моделювання того, як кожна окрема система КФЕ, наприклад, система КФЕ з точковим фокусуванням лінзами Френеля (рис. 2.3), встановлена на сонячному трекері, виконує стеження за Сонцем (рис.2.4). По-перше, необхідно визначити орієнтацію кожної окремої системи КФЕ для визначення ефекту затінення між сусідніми системами КФЕ. Моделювання тривимірного (3-D) простору для миттєвого положення КФЕ-систем під час щоденної роботи системи стеження за сонцем може бути здійснене за допомогою перетворення

координат. До існуючої трансформації координат було додано ще один одновимірний (1-D) простір для того, щоб полегшити тривимірну трансформацію координат шляхом виконання лінеаризації.

$$H_k = \begin{bmatrix} H_{kx} \\ H_{ky} \\ H_{kz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

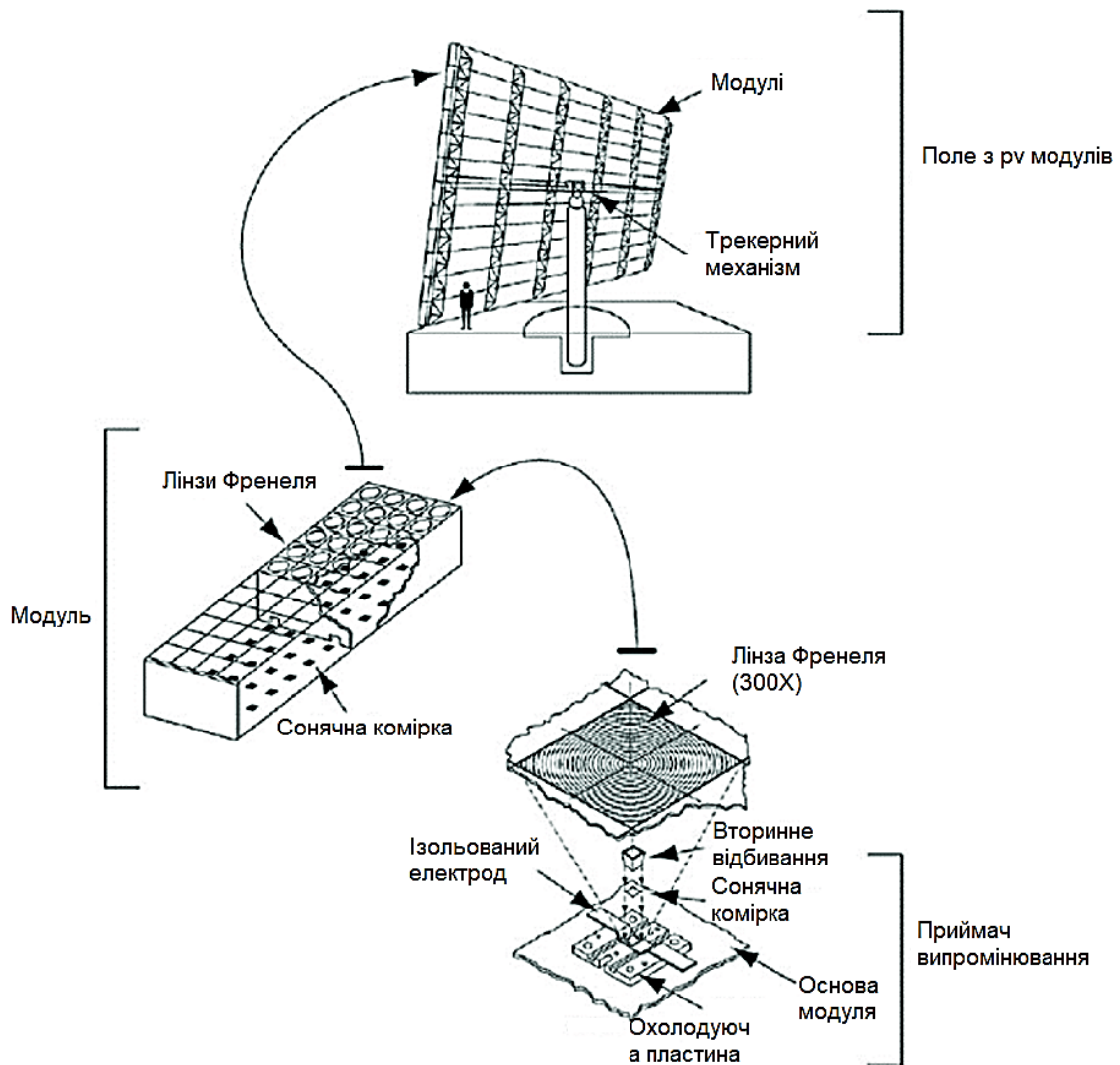


Рисунок 2.3 - Точково-фокусна система Френеля з лінзою Френеля, яка використовується в моделюванні планування ферми на біомасі

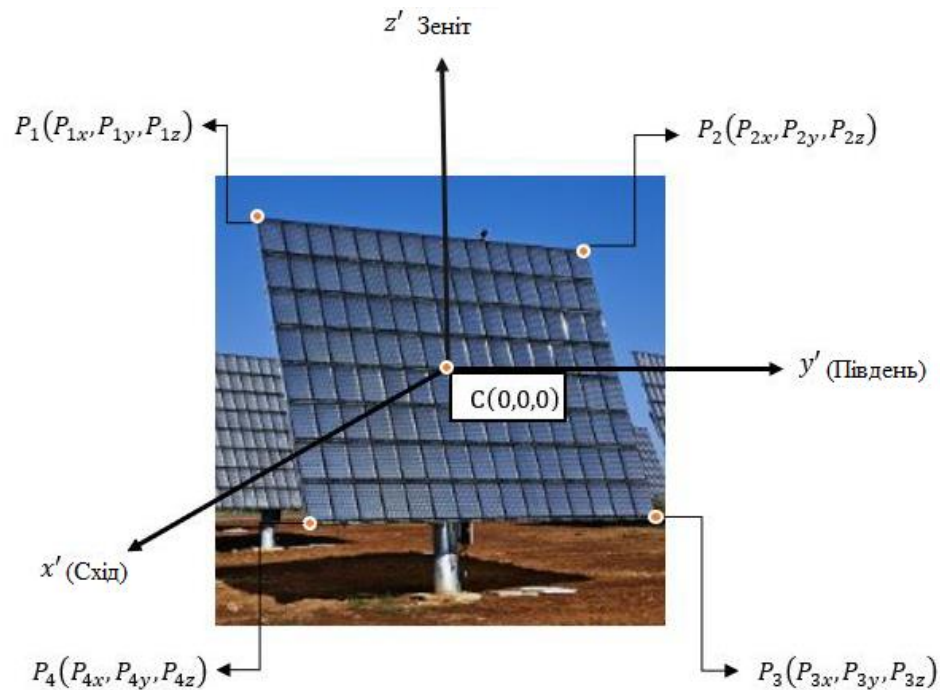


Рисунок 2.4 - Початкова координата для структурної рамки окремої системи ОВСН визначається в локальній системі координат, де початок координат визначається в центрі структурної рамки системи ОВСН, а P_i є кутовою крайньою точкою структурної рамки системи ОВСН

Для того, щоб перейти до перетворення координат, початок глобальної системи координат $O(0,0,0)$ визначається в центральній точці поля КФЕ, як показано на рис. 2.5, де позитивний напрямок осі X, x , вказує на схід (E); позитивний напрямок осі Y, y , вказує на північ (N); і позитивний напрямок осі Z, z , вказує на зеніт, де зеніт - це напрямок, протилежний гравітаційному притягуванню. Вважається, що початкова координата індивідуальної системи КФЕ задається в локальній системі координат, як показано на рис. 4, де локальний початок координат, $C(0,0,0)$, знаходиться в центрі структурної схеми системи КФЕ, а не в центральній точці поля КФЕ. Існує чотири кути системи КФЕ, кожен з яких представлений крайньою точкою. Координати чотирьох крайніх точок у координатному просторі задаються у вигляді вектора. Це можна представити рівнянням, наведеним нижче:

$$P_k = \begin{bmatrix} P_{kx} \\ P_{ky} \\ P_{kz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2a)$$

де $k = 1$ (для лівого верхнього кута, TL, кута структурної рами системи КФЕ);

$k = 2$ (для правого верхнього кута, TR, кута структурної рами системи КФЕ);

$k = 3$ (для правого нижнього кута, BR, кута структурної рами системи КФЕ);

$k = 4$ (для лівого нижнього кута, BL, кута структурної рами системи КФЕ).

Остаточне перетворення координат крайніх точок представлено у вигляді вектора у формі матриці, як показано в рівнянні (2.3) після виконання перетворення координат для структурної рами системи КФЕ.

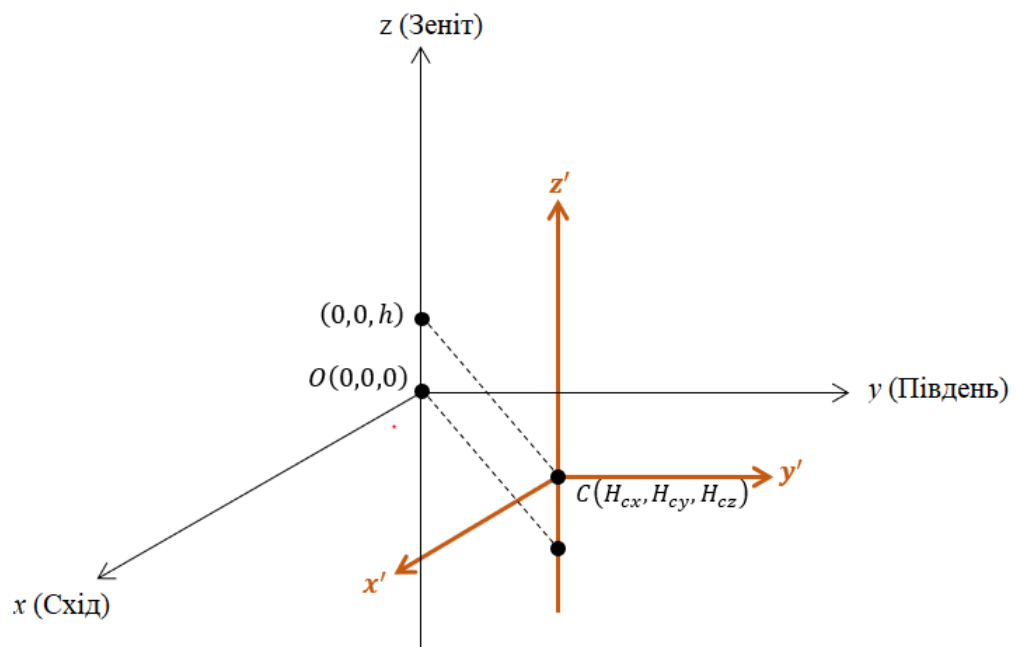


Рисунок 2.5 - Початок, $O(0,0,0)$, глобальної системи координат визначається як центр поля КФЕ. Кінцева координата структурної рамки системи КФЕ визначається як $C(H_{cx}, H_{cy}, H_{cz})$ після виконання перетворення координат.

Матриця трансляційного перетворення в цьому дослідженні базується на координаті центру окремої системи КФЕ, $C (H_{cx}, H_{cy}, H_{cz})$, вираженій в термінах глобальної системи координат, як показано в рівнянні нижче:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & H_{kx} \\ 0 & 1 & 0 & H_{ky} \\ 0 & 0 & 1 & H_{kz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Для азимутально-висотного методу стеження за сонцем є два параметри, які представляють два різні кутові переміщення структурної рамки системи КФЕ, тобто переміщення за азимутом і переміщення за висотою. Для того, щоб трансформувати положення структурної рамки системи КФЕ від початку глобальної системи координат до кінцевої координати, необхідним є метод обертального перетворення для трансформації положення за допомогою перетворення координат. Матриця обертального перетворення, що використовується для кута підйому, α , має вигляд

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Тоді як матриця обертального перетворення, застосована для азимутального кута, β має вигляд

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Остаточне положення конструктивної рами системи КФЕ після виконання обертального та поступального перетворення може бути показано як

$$H_k = MP_k \quad (2.7)$$

де матриця для перетворення координат записується у вигляді

$$M = [T_1][\beta][\alpha] \quad (2.8)$$

2.4 Алгоритм розрахунку падіння сонячного проміння

Падаючі сонячні промені, S , потрібні для того, щоб визначити тінь, яка відкидається на тестові системи КФЕ. У 2012 році Чонг і Тан заявили, що падаючий сонячний промінь може бути виражений за допомогою наступного рівняння [17]:

$$S = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$S_x = \cos \alpha_s \sin \beta_s \quad (2.10)$$

$$S_y = \cos \alpha_s \cos \beta_s \quad (2.11)$$

$$S_z = \sin \alpha_s \quad (2.12)$$

де α_s - кут піднесення Сонця;

β_s - кут азимута Сонця.

Перетворення координат виконуються як для сусідніх блокуючих систем КФЕ (систем КФЕ, які відкидають тінь на тестову систему КФЕ), так і для тестової системи КФЕ (системи КФЕ, яка тестується на ефект затінення) після обчислення кутів стеження за сонцем для імітації миттєвої орієнтації за сонцем обох систем КФЕ. Алгоритм промінь/площина потім імплементується в платформу моделювання MATLAB для обчислення площі тіні, що відкидається сусідніми блокуючими системами КФЕ на поверхню тестової системи КФЕ, як показано на рис. 2.6.

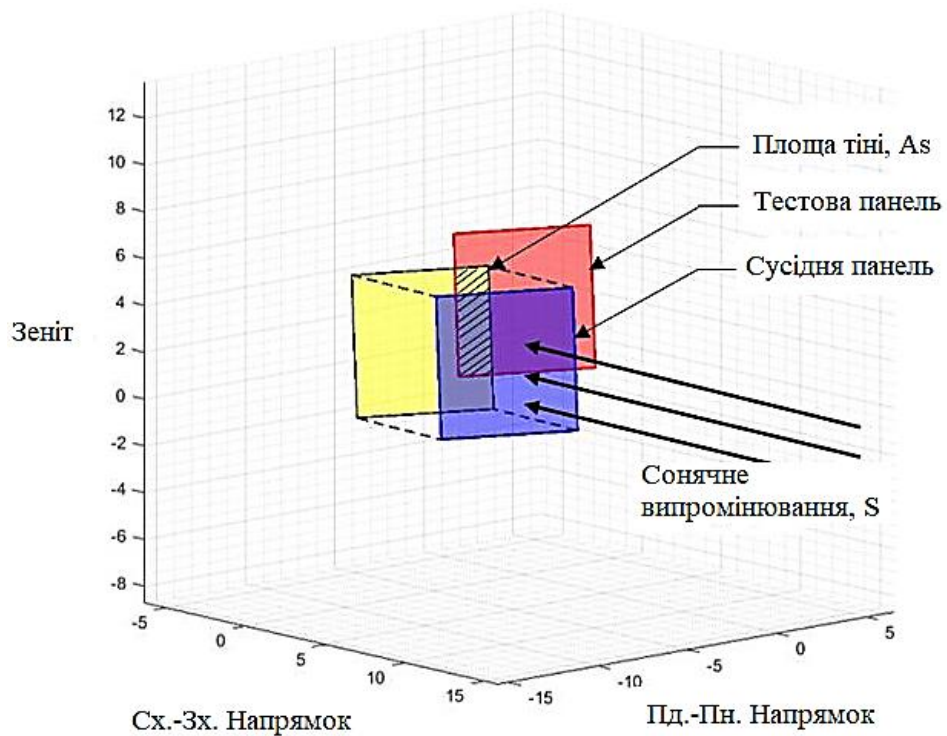


Рисунок 2.6 - Площа тіні, що відкидається сусідніми системами, розрахована за допомогою алгоритму промінь/площина після виконання перетворення координат для обох систем КФЕ

2.5 Особливості розрахунку нормативної вартості електроенергії

НВЕ - це параметр для оцінки економічного аспекту електростанції. Економічне обґрунтування фотоелектричних проектів аналізується та оцінюється за показником НВЕ, оскільки останнім часом технології сонячної енергетики набувають широкого поширення. Це може забезпечити зручність порівняння з іншими технологіями виробництва електроенергії. Існує кілька важливих факторів, що впливають на НВЕ сонячної електростанції: (а) місцеві погодні дані, (б) кількість сонячних концентраторів на певній ділянці землі, (в) загальний обсяг виробленої енергії, (г) витрати, пов'язані з землею, і (д) витрати на експлуатацію та обслуговування. Згідно з оглядовим дослідженням Branker та ін., вони доопрацювали і представили рівняння (2.5) як відповідне рівняння для розрахунку НВЕ [21]. Для визначення оптимальної схеми розташування сонячної електростанції [22-27] необхідно вибрати найнижче можливе

розрахункове значення НВЕ для системи КФЕ на сонячній електростанції.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T (I_t + O_t + M_t + F_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T S_t (1-d)^t / (1+r)^t} \quad (2.13)$$

де T - тривалість проекту в роках;

t - кількість років;

I_t - початкові капітальні витрати на системи КФЕ, включаючи будівництво, монтаж, апаратне та програмне забезпечення системи управління тощо;

M_t - витрати на технічне обслуговування систем КФЕ за t років;

O_t - експлуатаційні витрати систем КФЕ за t років;

F_t - процентні витрати систем КФЕ за t років;

r - ставка дисконтування систем КФЕ за t років;

S_t - річна номінальна енергопродуктивність систем КФЕ за t років;

d - темп деградації систем КФЕ.

2.6 Схема розташування поля панелей

На рисунках 2.7 та 2.8 зображено дві можливі конфігурації розташування поля, в яких всі окремі системи розміщені у вигляді квадратного та шахового поля геліостатів відповідно. Ці конфігурації розташування поля КФЕ зі специфікаціями, наведеними в Таблиці 2.1, використовуються в цьому дослідженні. Системи КФЕ для конкретного прикладу в цьому дослідженні розміщені у вигляді квадратних або шахових полів геліостатів з різною відстанню між ними в межах обраної земельної ділянки площею 62 500 м². Для того, щоб зробити узагальнення щодо відстані між системами, були запропоновані співвідношення D_{ew}/L (співвідношення відстані між системами КФЕ у напрямку схід-захід до розміру сонячної панелі), відношення D_m/L (відношення відстані між системами КФЕ у напрямку північ-південь до розміру сонячної панелі) та кут між ними, θ ,. Відношення D_{ew}/L і D_m/L можна розрахувати за допомогою наступних рівнянь (2.6a) і (2.6b). Коефіцієнт

покриття землі (КПЗ) також був використаний у дослідженні як відношення загальної площі системи КФЕ до загальної площі земельної ділянки.

$$D_{ew} / L = \frac{\text{Відстань між двома сусідніми системами КФЕ у напрямку зі сходу на захід}}{\text{Довжина системи КФЕ (L)}} \quad (2.14)$$

$$D_{ns} / L = \frac{\text{Відстань між двома сусідніми системами КФЕ у напрямку з півночі на південь}}{\text{Довжина системи КФЕ (L)}} \quad (2.15)$$

Таблиця 2.1 - Специфікація сонячної електростанції з системою КФЕ

Площа земельної ділянки	62,5 м ²
Механізм стеження за Сонцем	Азимутно-висотний метод
Коефіцієнт перетворення енергії системи КФЕ	30 %
Швидкість деградації	0.5%
Розмір фотоелектричної системи	6 м · 6 м = 36 м ²
Висота системи КФЕ	4 м

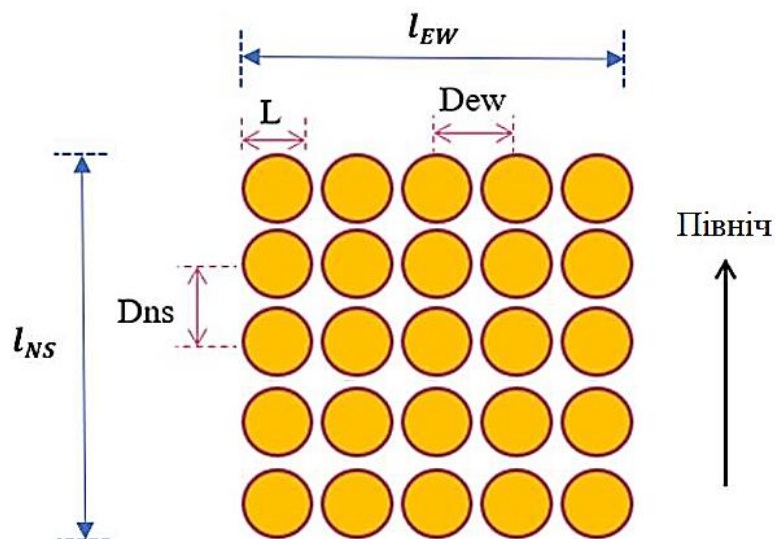


Рисунок 2.7 - Принципова схема для квадратного розташування сонячної

електростанції на сонячних батареях

При моделюванні шахової схеми розташування поля геліостатів, положення систем ФЕМ на сонячній електростанції показано на рисунку 2.8. У цьому прикладі враховано декілька кутів між ними, θ , а саме: 15 градусів, 30 градусів, 45 градусів, 60 градусів і 75 градусів.

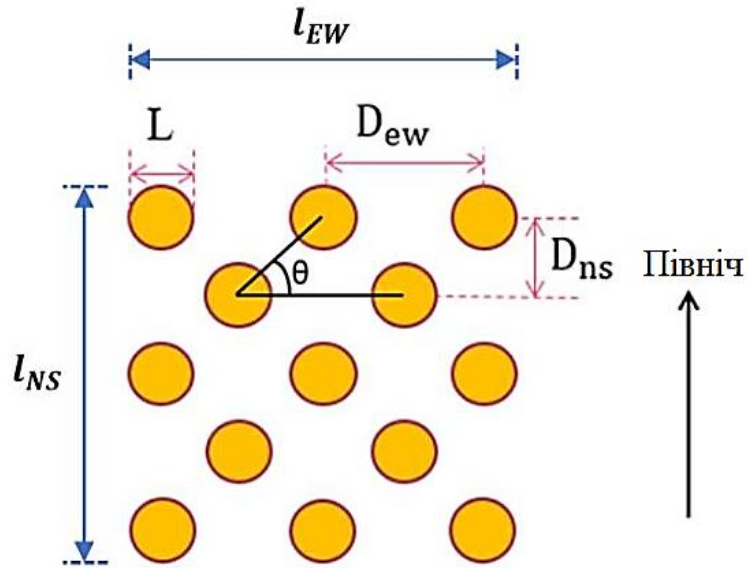


Рисунок 2.8 - Принципова схема розташування поля геліостатів сонячних фотоелектричних модулів у шаховому порядку

2.7 Річне виробництво енергії

Для розрахунку НВЕ необхідно розрахувати річне виробництво енергії сонячною електростанцією. Річний вихід енергії може бути розрахований за допомогою рівняння (2.16) з урахуванням місцевих метеорологічних даних, ефекту затінення, ефективності перетворення енергії системи КФЕ, розміру системи КФЕ та загальної кількості систем КФЕ на визначеній земельній ділянці. Часовий інтервал у 900 секунд (15 хвилин) обрано для отримання більш точних даних для однієї системи КФЕ.

$$\text{Річне виробництво енергії} = \sum_{i=1}^{N=365} \sum_{j=1}^{M=96} \frac{\eta \cdot T \cdot DNI_{i,j} \cdot (1 - S_{i,j}) \cdot A}{3,6 \cdot 10^6} \quad (2.16)$$

де i - кількість днів;
 j - кількість часових інтервалів в день;
 η - ефективність перетворення енергії системи КФЕ;
 T - часовий інтервал в секундах;
 DNI - пряме нормальне сонячне випромінювання;
 S - відсоток колективної площі, на яку впливає ефект затінення;
 A - загальна площа панелі кожної системи КФЕ.

2.8 Висновки до розділу

1. У результаті проведеного дослідження було розроблено та обґрунтовано комплексний обчислювальний підхід до оптимізації просторових конфігурацій сонячних електростанцій, оснащених двоосьовими системами концентратора фотоелектричної енергії (КФЕ). Запропонований алгоритм, реалізований у MATLAB, інтегрує фізичні, геометричні та економічні моделі, що дозволяє отримати високоточні оцінки впливу затінення, відстаней між сонячними панелями та компонентів стеження за Сонцем на річний енергетичний вихід та нормативну вартість електроенергії (НВЕ).

2. Аналіз двох базових схем компонування — квадратної та шахової — засвідчив, що геометричні особливості розміщення суттєво впливають на рівень взаємного затінення та, відповідно, на ефективність використання земельних ресурсів. Встановлено, що оптимізація відстаней між системами КФЕ в обох координатних напрямках (D_{ew}/L та D_m/L), а також варіація кутових зсувів у шаховому компонуванні забезпечують досягнення балансу між мінімізацією площі затінення та підвищенням коефіцієнта покриття землі.

3. Застосування алгоритмів координатних перетворень та методики «промінь/площина» дозволило здійснити просторово-точне моделювання орієнтації сонячних панелей в умовах змінних положень Сонця. Це забезпечило кількісну оцінку миттєвої тіні на поверхнях КФЕ та дало змогу моделювати реальні річні втрати енергії з високою часовою роздільною здатністю.

Використання загальної формули стеження (GF) та двоосьового азимутально-висотного методу підтвердило свою ефективність для точного визначення кутових положень систем упродовж року.

4. Розрахунок річного виробництва енергії здійснено з урахуванням локальних метеорологічних характеристик, ефективності перетворення, деградації системи та інтегрального впливу затінення. Це дозволило отримати функціонально достовірні залежності, необхідні для економічного аналізу. На основі рівняння НВЕ визначено економічно доцільні конфігурації, що забезпечують мінімізацію витрат на одиницю генерованої електроенергії за збереження високого енергетичного виходу.

5. Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що запропонований підхід формує методологічну основу для інтелектуального проєктування великих фотоелектричних комплексів, оскільки враховує багатфакторний характер взаємодії між геометрією поля, сонячною динамікою, енергетичною продуктивністю та економічною доцільністю. Це дослідження демонструє, що інтеграція математичного моделювання затінення, точного відстеження Сонця та економічної оптимізації є ключем до підвищення ефективності та інвестиційної привабливості сонячних електростанцій промислового масштабу.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Затінення

Під час моделювання, тінь, що відкидається на загальну площу системи КФЕ протягом року, розраховується кожні 15 хвилин, як показано в рівнянні (3.1). Для квадратної конфігурації розташування поля геліостатів як відношення D_{ew}/L , так і відношення D_m/L змінюються від значення 1,50 до 3,00 з інтервалом 0,25, щоб знайти оптимальну відстань між двома системами КФЕ. Мінімальне значення співвідношення D_{ew}/L та D_m/L спочатку встановлюється на рівні 1.50, що є мінімальною відстанню, необхідною між двома найближчими системами КФЕ, щоб уникнути будь-яких зіткнень на їхніх траєкторіях стеження за сонцем. Загальна кількість систем КФЕ на визначеній земельній ділянці залежить від значень співвідношення D_{ew}/L та D_m/L .

Для того, щоб забезпечити порівняння між квадратною та шаховою схемами розташування, моделювання обох схем було проведено при однаковому коефіцієнті покриття земельної ділянки (КПЗ), який дорівнює $= 1$. Коефіцієнт пропорційності земельної ділянки - це відношення довжини земельної ділянки (I_{EW}) до ширини земельної ділянки (I_{NS}). Схема розташування поля геліостатів в шаховому порядку була змодельована для різних співвідношень D_{ew}/L в діапазоні від 1,5 до 7,0 і різних кутів міжряддя θ в діапазоні від 15 до 75 градусів. Виходячи з результатів моделювання, отриманих при шаховому розташуванні поля геліостатів, мінімальне значення співвідношення D_{ew}/L для кожного кута міжряддя є різним. Це мінімальне значення встановлюється для того, щоб уникнути можливого зіткнення між будь-якими двома системами КФЕ. Максимально можлива кількість систем КФЕ, яку необхідно розмістити на зазначеній земельній ділянці площею 62500 м², розрахована як для квадратної, так і для шахової конфігурацій розміщення у Таблиці 3.1 та Таблиці 3.2 відповідно.

Середньорічний відсоток колективної площі, на яку впливає ефект затінення, для квадратного та шахового розташування поля геліостатів

показано на рисунках 3.1 та 3.2 відповідно. На рисунку 3.1 показано, що середньорічний відсоток затіненої площі для квадратної конфігурації розташування поля геліостатів обернено пропорційний як відношенню D_{ew}/L , так і відношенню D_m/L . Результати моделювання також показують, що відстань між будь-якими двома сусідніми системами КФЕ у напрямку схід-захід (E-W) має більший вплив на ефект затінення, ніж у напрямку північ-південь (N-S). Середньорічний відсоток площі затінення для шахової конфігурації розташування поля геліостатів був змодельований для різних кутів між ними, як показано на рисунку 3.2, який обернено пропорційний відношенню D_{ew}/L . Чим більша відстань між двома сусідніми системами КФЕ, тим менший ефект затінення буде спостерігатися між системами КФЕ.

Таблиця 3.1 - Максимально можлива кількість систем КФЕ, які можна встановити на визначеній земельній ділянці площею 62 500 м² для квадратної схеми розташування поля геліостатів

$\frac{D_{ew}}{L}$ $\frac{D_{ns}}{L}$	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
1,50	729	621	540	486	432	405	351
1,75	621	529	460	414	368	345	299
2,00	540	460	400	360	320	300	260
2,25	486	414	360	324	288	270	234
2,50	432	368	320	288	256	240	208

Однак, на жаль, це призводить до збільшення використання земельної ділянки сонячної електростанції, що призводить до збільшення витрат, пов'язаних із землею.

Річна ефективність детінізації:

$$S_{i,j} = \sum_{i=1}^{N=365} \sum_{j=1}^{M=96} \frac{\eta_s(i,j)}{NM} \quad (3.1)$$

де $\eta_s = \frac{(A_T - A_s)}{A_T}$, η_s - тіньова ефективність;

A_T - площа тестової КФЕ;

A_s - системи та площа тіні.

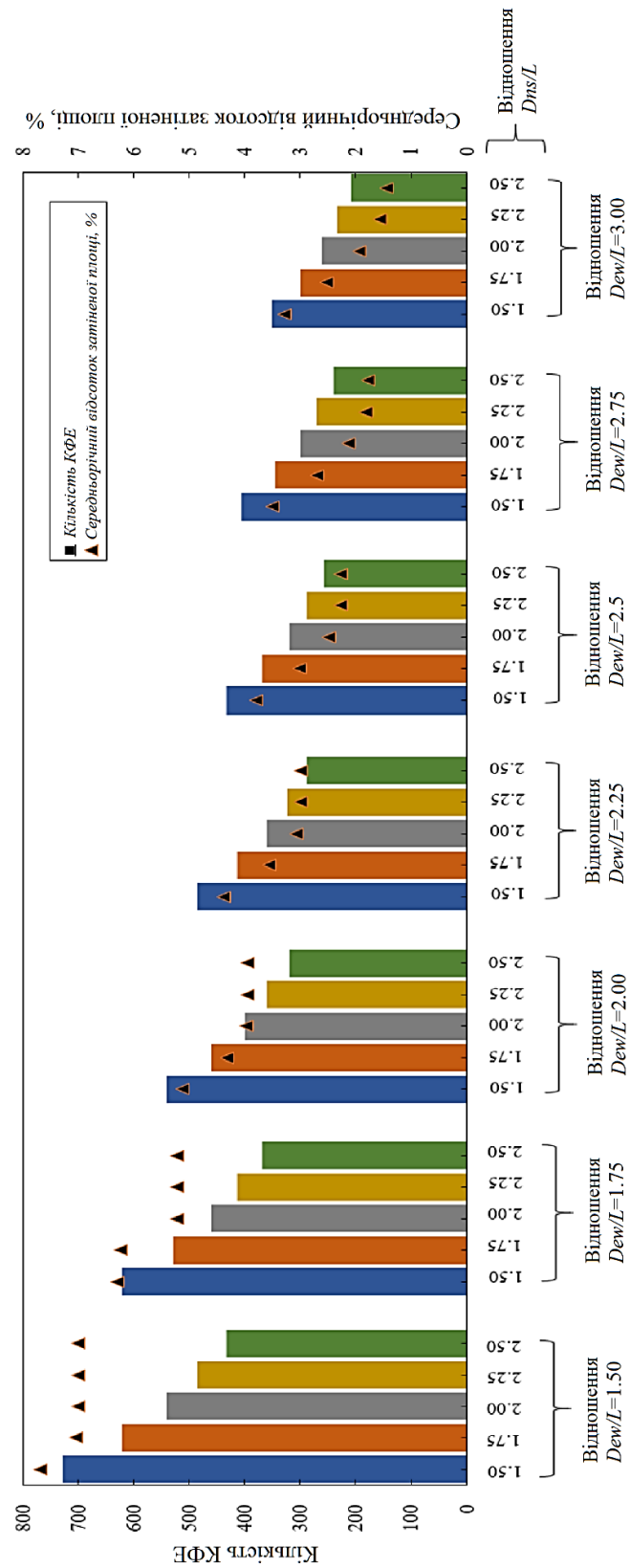


Рисунок 3.1 - Середньорічний відсоток затіненої площі (%) для квадратного розташування поля геліостатів

Таблиця 3.2 - Максимально можлива кількість систем КФЕ, які можна встановити на визначеній земельній ділянці площею 62 500 м² для шахового розташування поля геліостатів

θ	D_{ew}/L											
	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00
15	С	С	С	С	С	С	С	С	С	357	306	258
30	С	С	С	621	460	368	279					
45	С	718	545	365	265	221						
60	837	492	314	216	161	126						
75	405	226	149	108	81	63						

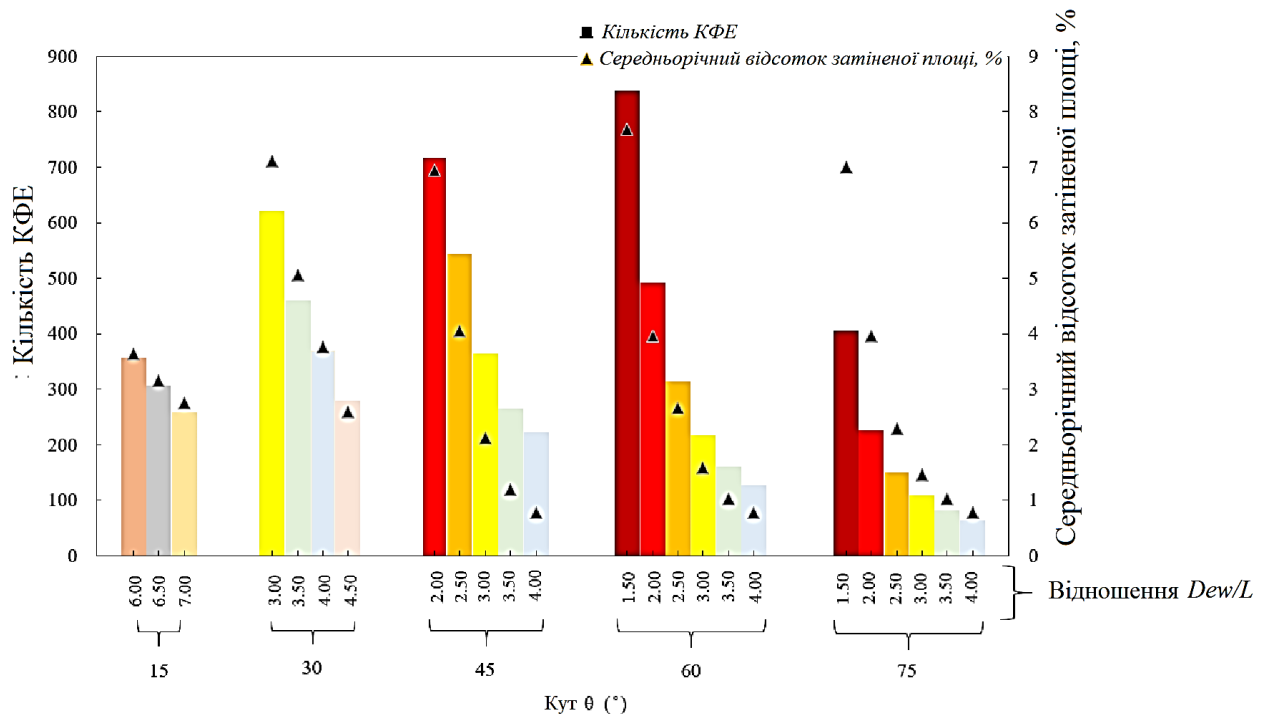


Рисунок 3.2 - Середньорічний відсоток площі затінення (%) для шахового розташування поля геліостатів. Результати були взяті з мінімального співвідношення D_{ew}/L для кожного кута, щоб уникнути зіткнення між сусідніми системами КФЕ. Ітерація алгоритму моделювання не буде продовжена, коли НВЕ зростає зі збільшенням співвідношення D_{ew}/L , щоб заощадити час обчислень

3.2 Розрахунок річного виробництва енергії

Річне виробництво енергії сонячною електростанцією, що складається з систем КФЕ, також моделюється з урахуванням ефекту затінення протягом кожних 15 хвилин протягом року, де середнє річне горизонтальне опромінення становить $1800 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Результати моделювання річного виробництва енергії як для квадратної, так і для шахової конфігурацій розміщення сонячних батарей показані на рисунках 3.3 і 3.4 відповідно з припущенням, що КПЗ дорівнює 1, а вартість землі становить 13 доларів США за квадратний метр на заданій земельній ділянці площею $62\,500 \text{ м}^2$.

Річне виробництво енергії для кожної системи КФЕ прямо пропорційне співвідношенню D_{ew}/L та D_m/L для конфігурації розташування квадратного поля геліостатів через збільшення відстані між будь-якими двома сусідніми системами КФЕ. Це зменшує ефект затінення [28-30], а отже, збільшує вироблення енергії для кожної системи КФЕ. З іншого боку, річна генерація енергії поля КФЕ обернено пропорційна як співвідношенню D_{ew}/L , так і співвідношенню D_m/L , оскільки загальна кількість систем КФЕ, які можна розмістити на визначеній площі, зменшується. Що стосується конфігурації розташування поля геліостатів у шаховому порядку, то з графіка видно таку ж закономірність, як і для квадратного розташування поля геліостатів, тобто: (1) річне виробництво енергії для кожної системи КФЕ прямо пропорційне співвідношенню D_{ew}/L ; (2) річне виробництво енергії полем ФЕУ обернено пропорційне співвідношенню D_{ew}/L .

Відповідно до рисунків 3.3 і 3.4, менша відстань між системами КФЕ може збільшити річне виробництво енергії на полі КФЕ в межах певної території. Однак, цей підхід потребує збільшення кількості фотоелектричних систем на сонячній електростанції, що також опосередковано збільшить інвестиційні витрати на сонячну електростанцію.

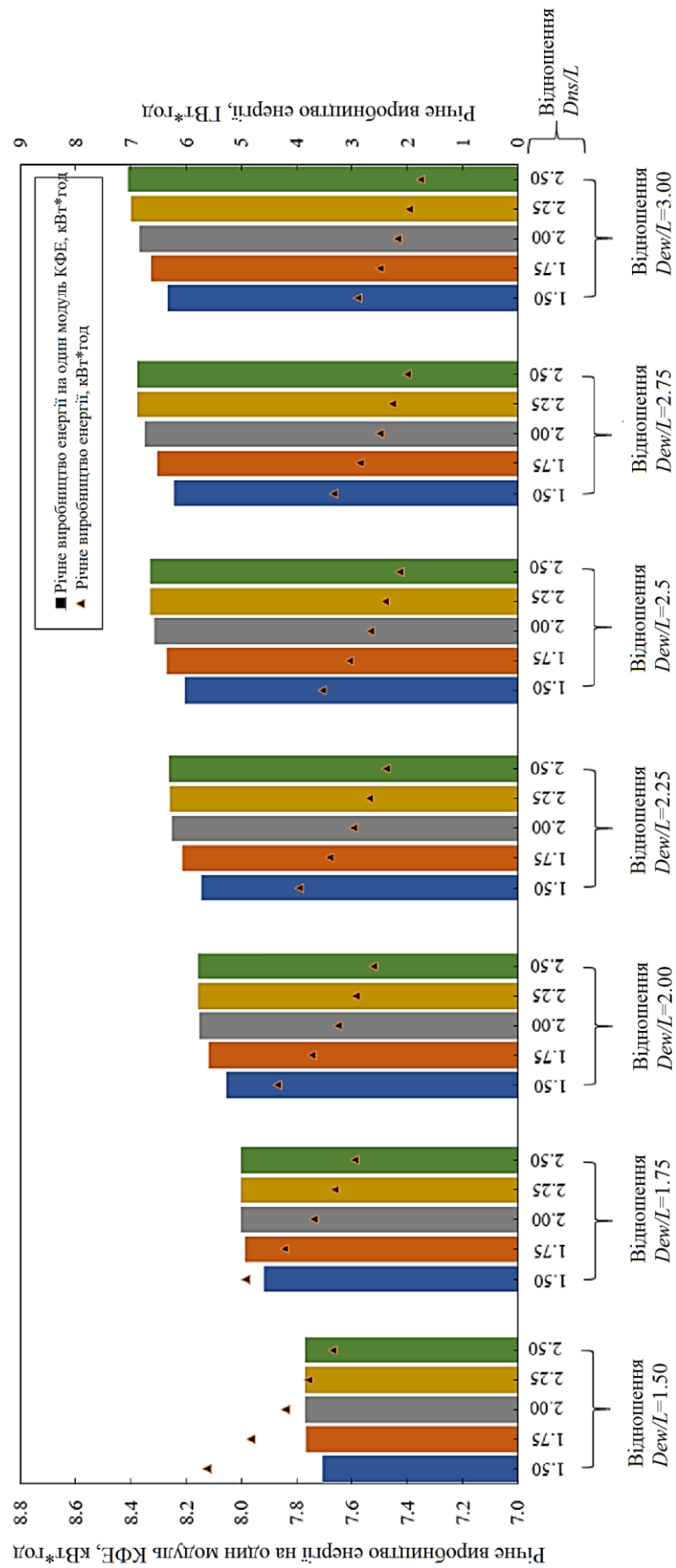


Рисунок 3.3 - Річне виробництво енергії на систему КФЕ (кВт·год) та річне виробництво енергії (ГВт·год) для квадратних полів геліостатів

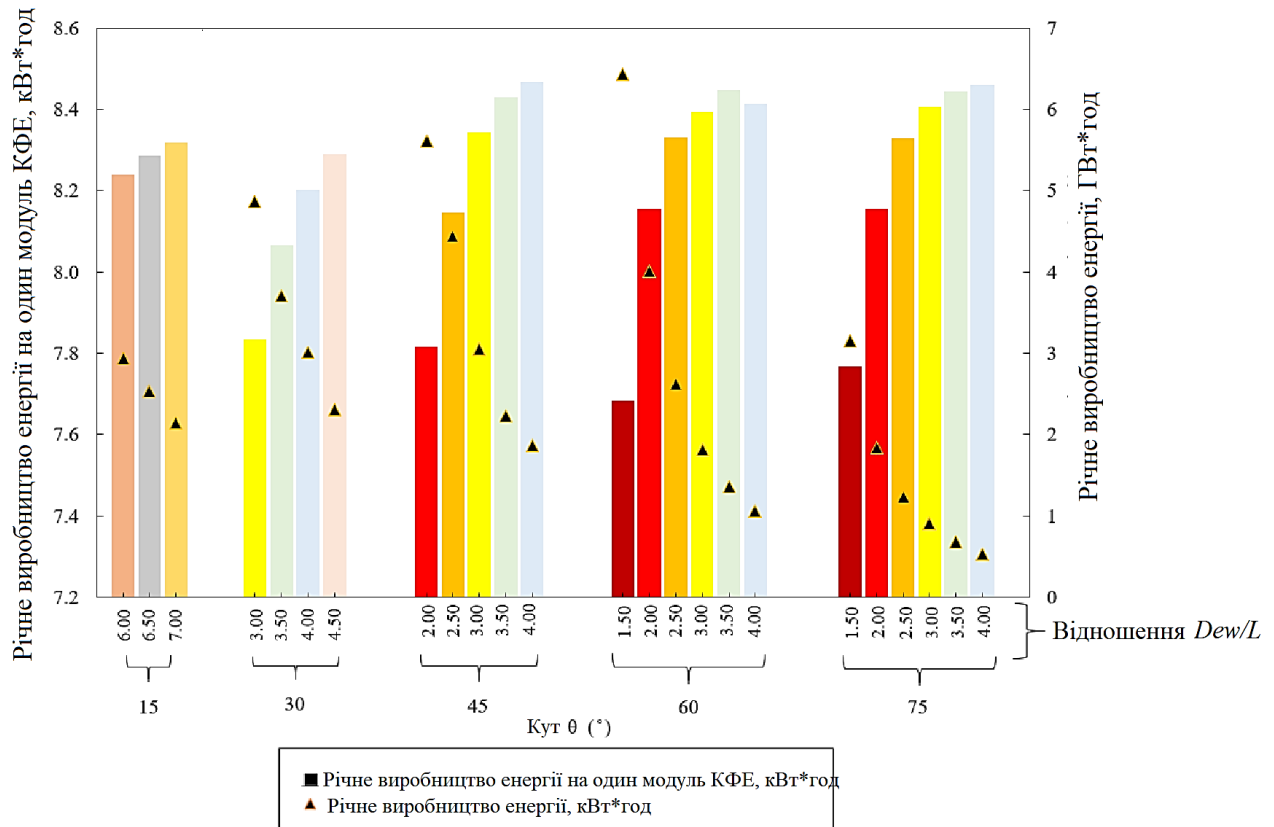


Рисунок 3.4 - Річне виробництво енергії на одну систему КФЕ (кВт·год) та річне виробництво енергії (ГВт·год) для шахового розташування поля геліостатів. Результати були взяті з мінімального співвідношення D_{ew}/L для кожного кута, щоб уникнути зіткнення між сусідніми системами КФЕ. Ітерація алгоритму моделювання не буде продовжена, коли НВЕ зростає зі збільшенням співвідношення D_{ew}/L , щоб заощадити обчислювальний час.

Крім того, такий підхід також призведе до значного зниження ефективності перетворення енергії для кожної системи КФЕ, оскільки вона має високий коефіцієнт заповнення з більшим впливом ефекту затінення. НВЕ сонячної електростанції з КФЕ-системою має бути знижена, щоб конкурувати з НВЕ традиційних електростанцій. Це необхідно для залучення більшого інтересу до інвестицій в сонячні електростанції. Таким чином, важливо визначити виробництво енергії на одиницю витрат в термінах НВЕ, щоб оцінити оптимальну схему розташування, а також економічну доцільність сонячної електростанції.

3.3 Розрахунок нормативної вартості електроенергії

НВЕ береться до уваги при проектуванні схеми розташування поля КФЕ для того, щоб визначити найбільш оптимальне значення для: (1) співвідношення D_{ew}/L і D_{ns}/L у випадку квадратної конфігурації, або (2) найбільш оптимальних значень для співвідношення D_{ew}/L і відстані між модулями у випадку шахової конфігурації. На основі специфікації, наведеної в Таблиці 3.3, були змодельовані значення НВЕ для квадратної та шахової конфігурацій розміщення поля геліостатів. Результати моделювання НВЕ для квадратної та шахової конфігурацій наведені на рисунках 3.5 та 3.6 відповідно. У цьому дослідженні витрати на виплату відсотків приймаються рівними нулю, оскільки для фінансування цієї сонячної електростанції не залучаються кредити і не розглядаються жодні стимули.

Таблиця 3.3 - Параметри, необхідні для розрахунку НВЕ сонячної електростанції, що складається з систем КФЕ (взяті із відкритих джерел)

Оренда землі 13 \$/м ²	800 625 \$
Виймка ґрунту та підготовка землі	23809.52 \$
Ставка дисконтування	3%
Ставка девальвації	0.5%
Термін служби системи КФЕ, років	25 років
Відсоткові витрати за t років	0%
Вартість будівництва та монтажу на КФЕ трежер	26249.14 \$
Витрати на експлуатацію та обслуговування сонячних електростанцій системи	14\$/кВт·год

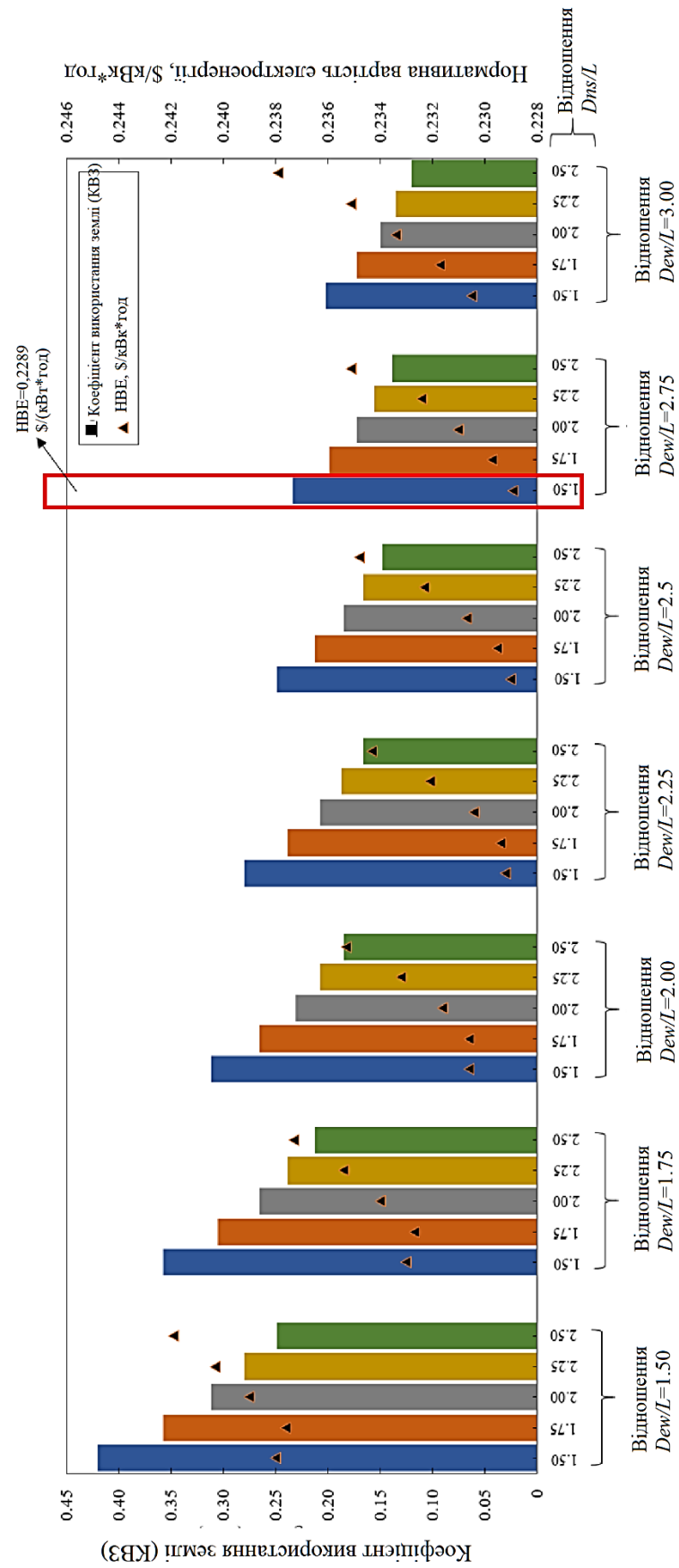


Рисунок 3.5 - Коефіцієнт пропорційності землі (КПЗ) та НВЕ (\$/кВт.год)
для квадратних полів геліостатів при КПЗ = 1

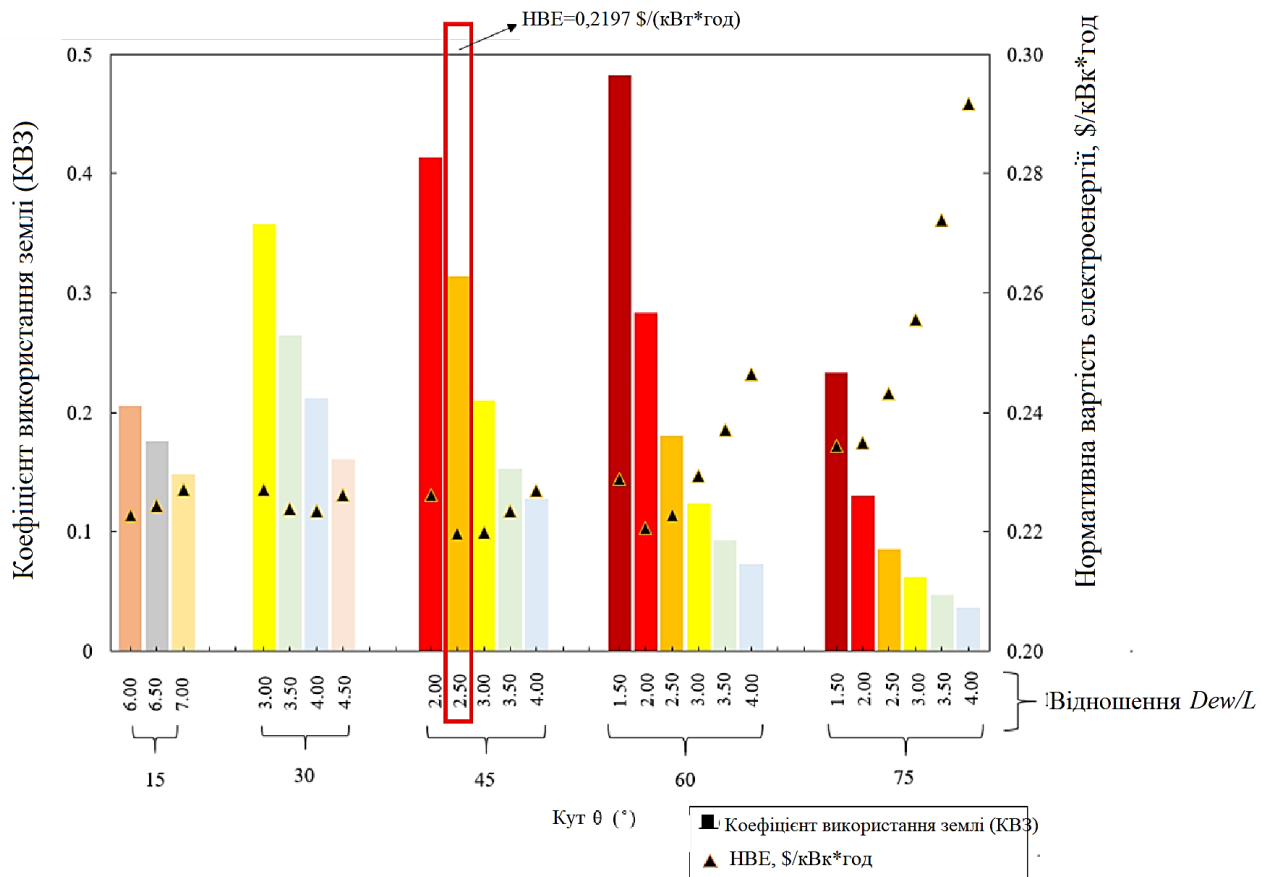


Рисунок 3.6 - Коефіцієнт використання землі (KB3) та НВЕ (\$/кВт·год) для шахового розташування поля геліостатів при КПЗ = 1. Результати були взяті з мінімального співвідношення D_{ew}/L для кожного кута, щоб уникнути зіткнення між сусідніми фотоелектричними системами. Ітерація алгоритму моделювання не буде продовжена, коли НВЕ зростає зі збільшенням співвідношення D_{ew}/L , щоб заощадити обчислювальний час

Згідно з результатами, показаними на рисунках 3.5 і 3.6, оптимальне розташування квадратного поля геліостатів у цьому дослідженні є при співвідношенні D_{ew}/L 2,75 і D_{ns}/L 1,50, що дає найнижче значення НВЕ 0,2289 \$/кВт·год, в той час як оптимальне розташування шахматного поля геліостатів визначається при співвідношенні D_{ew}/L 2,50 і куті між ними 45 градусів, що має значення НВЕ 0,2197 \$/кВт·год. Цікаво бачити, що відповідна середньорічна відсоткова площа затінення не є найнижчою у вищезгаданих випадках. Для випадку шахового розташування поля геліостатів ітерація алгоритму моделювання не буде продовжуватися, коли НВЕ зростає зі

збільшенням співвідношення D_{ew}/L , щоб заощадити обчислювальний час.

Згідно з результатами моделювання, важливо враховувати НВЕ під час оптимізації проекту планування поля, щоб визначити мінімальну вартість електроенергії за кВт/год для проекту сонячної електростанції. Згідно з результатами моделювання як квадратної, так і шахової конфігурацій розміщення поля геліостатів, найбільш оптимальним варіантом розміщення сонячної електростанції є шахове поле геліостатів, оскільки він має нижче значення НВЕ, ніж квадратна конфігурація розміщення поля геліостатів. Таким чином, оптимізованим варіантом розташування є шахматне з найнижчим значенням НВЕ при співвідношенні D_{ew}/L 2,50 і куті міжряддя 45 градусів, при якому КПЗ = 1, а задана площа земельної ділянки становить 62 500 м². Буде важко порівняти наш алгоритм з методами, що використовуються іншими дослідниками, оскільки вони використовують різні підходи. У цьому випадку ми використовуємо НВЕ замість ефекту затінення для оптимізації проекту планування поля. Методологія, представлена в цьому дослідженні, може бути використана інвесторами та інженерами в якості інструменту або керівництва для оптимізації проекту розміщення сонячної електростанції з найнижчим значенням НВЕ.

3.4 Крайовий ефект

Існує багато попередніх тематичних досліджень, виконаних іншими дослідниками без урахування крайового ефекту при моделюванні сонячних електростанцій. В їхніх дослідженнях передбачалося, що всі КФЕ-системи оточені однаковою кількістю сусідніх КФЕ-систем. Це також стосується і тих фотоелектричних систем, які розміщені на краю сонячної електростанції. Таким чином, в цьому дослідженні проводяться додаткові дослідження, щоб з'ясувати, чи потрібно враховувати крайовий ефект при оптимізації планування поля. Результати моделювання річного виробітку енергії та НВЕ, як показано на рисунках 3.3, 3.4, 3.5 і 3.6, отримані з урахуванням крайового ефекту. Для того,

щоб провести порівняльне дослідження, моделювання річного виробництва енергії та НВЕ було виконано без врахування крайового ефекту. Оптимальна конфігурація розміщення квадратного та шахового поля геліостатів показана в таблиці 3.4 з урахуванням та без урахування крайового ефекту.

Було виявлено, що для квадратного поля геліостатів з врахуванням та без врахування крайового ефекту оптимальна конфігурація розміщення є однаковою. Однак, існують відмінності в їх річному виробництві енергії та значенні НВЕ. Різниця у відсотках для значення НВЕ між випадками з урахуванням і без урахування крайового ефекту становить 0,30%, тоді як різниця у відсотках у річному виробництві енергії становить 30% для квадратного поля геліостатів. Річне виробництво енергії з урахуванням крайового ефекту становить 3,3381 ГВт·год, що трохи вище, ніж річне виробництво без урахування крайового ефекту 3,3279 ГВт·год. На противагу цьому, НВЕ без врахування граничного ефекту становить 0,2296 \$/кВт·год, що дещо вище, ніж НВЕ 0,2289 \$/кВт·год з врахуванням граничного ефекту. Це пов'язано з переоцінкою ефекту затінення при моделюванні сонячної електростанції у випадку без урахування крайового ефекту, особливо для тих фотоелектричних систем, які розміщені близько до краю сонячної електростанції, що призводить до меншого річного виробітку енергії. Різниця у відсотках між річним виробництвом енергії поля КФЕ з урахуванням і без урахування крайового ефекту при однакових параметрах конфігурації розміщення (D_{ew}/L і D_{ns}/L) знаходиться в діапазоні від 0,11 % до 0,44 % для квадратної конфігурації розміщення поля геліостатів.

Згідно з результатами, наведеними в таблиці 3.4, спостерігається різна оптимізована конфігурація розташування шахового поля геліостатів для випадків з урахуванням і без урахування крайового ефекту. Оптимізована конфігурація розташування шахового поля геліостатів без врахування крайового ефекту спостерігається при конфігурації розташування $D_{ew}/L = 3,00$ та куті міжряддя = 45° , тоді як оптимізована конфігурація розташування шахового поля геліостатів з врахуванням крайового ефекту спостерігається при

конфігурації розташування $D_{ew}/L = 2,50$ та куті міжряддя $= 45^\circ$. Випадок врахування крайового ефекту показав значно більшу кількість річної генерації енергії, яка становить 4,4400 ГВт·год порівняно з 3,0397 ГВт·год у випадку без врахування крайового ефекту для оптимізованої конфігурації шахматного розміщення модулів. І навпаки, значення НВЕ без урахування крайового ефекту становить 0,2202 \$/кВт·год, що трохи вище, ніж 0,2197 \$/кВт·год у випадку з урахуванням крайового ефекту.

Таблиця 3.4 - Оптимальна конфігурація компоновки для випадків врахування та неврахування крайового ефекту при моделюванні сонячної електростанції

	Макет Конфігурація	Параметри		Річний Енергія Генерація (ГВт·год)	НВЕ (\$/кВт·год)
Площа поля геліостатів	Без крайового ефекту	D_{ew}/L	D_{ns}/L	3,3279	0,2296
		2,75	1,50		
	З краєвим ефектом	D_{ew}/L	D_{ns}/L	3,3381	0,2289
		2,75	1,50		
Поле геліостатів у шаховому порядку	Без крайового ефекту	D_{ew}/L	Кут θ	3,0397	0,2202
		3,00	45		
	З крайовим ефектом	D_{ew}/L	Кут, θ	4,4400	0,2197
		2,50	45		

Порівняння між випадками оптимізованої конфігурації шахового поля геліостатів з урахуванням і без урахування крайового ефекту показало невелику різницю в 0,23% в НВЕ, але існує очевидна різниця в 31,53% в річному виробництві електроенергії. Оптимальна відстань зі сходу на захід між

сусідніми панелями, які розташовані ближче одна до одної, спостерігається при врахуванні крайового ефекту, і це призвело до значного збільшення річного виробництва енергії на 31,53% порівняно з оптимальною конфігурацією розташування без урахування крайового ефекту. Різниця у відсотках між річним виробництвом енергії при розташуванні фотоелектричних модулів у шаховому порядку з урахуванням і без урахування крайового ефекту при однакових значеннях параметрів розташування (D_{ew}/L і θ) коливається в межах від 0,05% до 0,56%. На основі декількох спостережень в результатах цього дослідження рекомендується враховувати крайовий ефект при моделюванні річного виробітку енергії та НВЕ, оскільки існує значний вплив цього крайового ефекту на моделювання сонячної електростанції. Таким чином, доведено, що крайовий ефект необхідно враховувати в процесі оптимізації конфігурації сонячної електростанції.

3.5 Витрати, пов'язані з розташуванням на земляній поверхні

Відповідно до розділу 3.3, оптимальна конфігурація розташування сонячної електростанції може бути визначена до тих пір, поки розрахована НВЕ має найнижче значення. Було проведено ще одне додаткове дослідження шляхом варіювання вартості оренди землі з точно такою ж заданою площею 62 500 м² як для квадратної, так і для шахової конфігурацій розміщення сонячної електростанції, щоб дослідити і з'ясувати, як вартість оренди землі впливає на оптимальну конфігурацію розміщення і значення НВЕ сонячної електростанції. Таким чином, було проведено ряд симуляцій для декількох варіантів вартості оренди землі, а саме: 12,81 \$ за кв. метр, 25,63 \$ за кв. метр, 38,44 \$ за кв. метр, 51,26 \$ за кв. метр, 64,07 \$ за кв. метр та 76,89 \$ за кв. метр.

Результати, отримані в результаті моделювання, наведені в Таблиці 3.5. В цілому, НВЕ як для оптимальної квадратної, так і для шахової конфігурації поля геліостатів як для оптимального квадратного поля геліостатів, так і для конфігурації з шаховим розташуванням зростає зі збільшенням вартості оренди

землі. Крім того, оптимальна конфігурація квадратного та шахового розміщення змінюється за різної вартості оренди землі. Відстань між будь-якими двома системами КФЕ для оптимальної квадратної та шахової конфігурації розташування зменшується зі збільшенням вартості оренди землі. Однак така вартість оренди землі може бути неминуче високою, оскільки в деяких країнах земля є дефіцитною. Таким чином, результати моделювання показали, що для зменшення значення НВЕ доцільно зменшити відстань між системами КФЕ, хоча виробництво енергії для кожної системи КФЕ буде меншим через більшу кількість ефекту затінення. Крім того, оптимальний коефіцієнт пропорційності землі (КПЗ) також зростає, оскільки вартість оренди землі стає вищою. У випадку з вищим ОКС на певній земельній ділянці встановлюється більше систем КФЕ. Таким чином, річне виробництво енергії також пропорційно зростає. Ці результати довели, що на НВЕ та оптимальну конфігурацію розташування всієї сонячної електростанції впливатиме різна вартість оренди землі.

3.6 Коефіцієнт пропорційності земельної ділянки

У всіх вищезгаданих прикладах цього дослідження коефіцієнт пропорційності землі (КПЗ) спеціально встановлюється на одиницю ($\text{КПЗ} = 1$), при якому розмір земельної ділянки моделює ідеальний квадрат. Однак на практиці це буде дуже сильно залежати від доступності та ландшафту земельної ділянки. КПЗ сонячної електростанції насправді є досить складним для комплексного наукового аналізу, оскільки кожне значення КПЗ передбачає трудомістке та складне проектування поля СЕС, яке також повинно забезпечувати оптимізацію різних параметрів одночасно. Незважаючи на це, в даному дослідженні підкреслюється, що КПЗ дійсно впливають на продуктивність поля КФЕ. У цьому розділі будуть розглянуті три тематичні дослідження, а саме: КПЗ 0,5, 1,0 та 2,0 було обрано для спостереження за його впливом на річне виробництво енергії та НВЕ на загальній земельній площі 62

500 м² при вартості землі 12,81 \$/м². Було змодельовано оптимальну конфігурацію квадратних та шахових полів геліостатів для досягнення найнижчої НВЕ у кожному з варіантів розташування сонячної електростанції, як показано на рисунку 3.7.

Згідно з результатами моделювання, які зображені на рисунку 3.7, оптимальною конфігурацією розміщення квадратного поля геліостатів, яка забезпечує найнижчий НВЕ для КПЗ 0,5, 1 і 2, є $D_{ew}/L = 2,25$ і $D_{ns}/L = 1,50$, $D_{ew}/L = 2,75$ і $D_{ns}/L = 1,50$, а також $D_{ew}/L = 2,50$ і $D_{ns}/L = 1,50$ відповідно. Тоді як оптимальною конфігурацією розташування шахового поля геліостатів, яка дає найнижчу НВЕ для КПЗ 0,5, 1 і 2, є $D_{ew}/L = 3,50$ з кутом міжряддя = 30°, $D_{ew}/L = 2,50$ з кутом міжряддя = 45° і $D_{ew}/L = 3,00$ з кутом міжряддя = 45° відповідно. Це свідчить про те, що оптимальні конфігурації розміщення квадратного та шахового поля геліостатів значною мірою залежать від КПЗ. Крім того, результати моделювання також показали, що конфігурація розміщення в шаховому порядку має нижче значення НВЕ, ніж конфігурація розміщення в квадратному порядку для всіх трьох випадків, які враховують КПЗ. Таким чином, КПЗ також є однією з важливих змінних, які можуть впливати на оптимальну конфігурацію розташування сонячної електростанції. На основі рисунку 3.7 ми бачимо, що найоптимальнішою конфігурацією є шахове поле геліостатів з ККД 0,46, що набагато вище, ніж у порівнянні з найкращою конфігурацією в іншій дослідницькій роботі, проведеній Діас-Дорадо, Сідрасом і Карілло [31], де оптимальна конфігурація має ККД 0,33. Це ще раз доводить, що важливо використовувати НВЕ як фактор для оптимізації конфігурації розташування сонячної електростанції, а не ефект затінення.

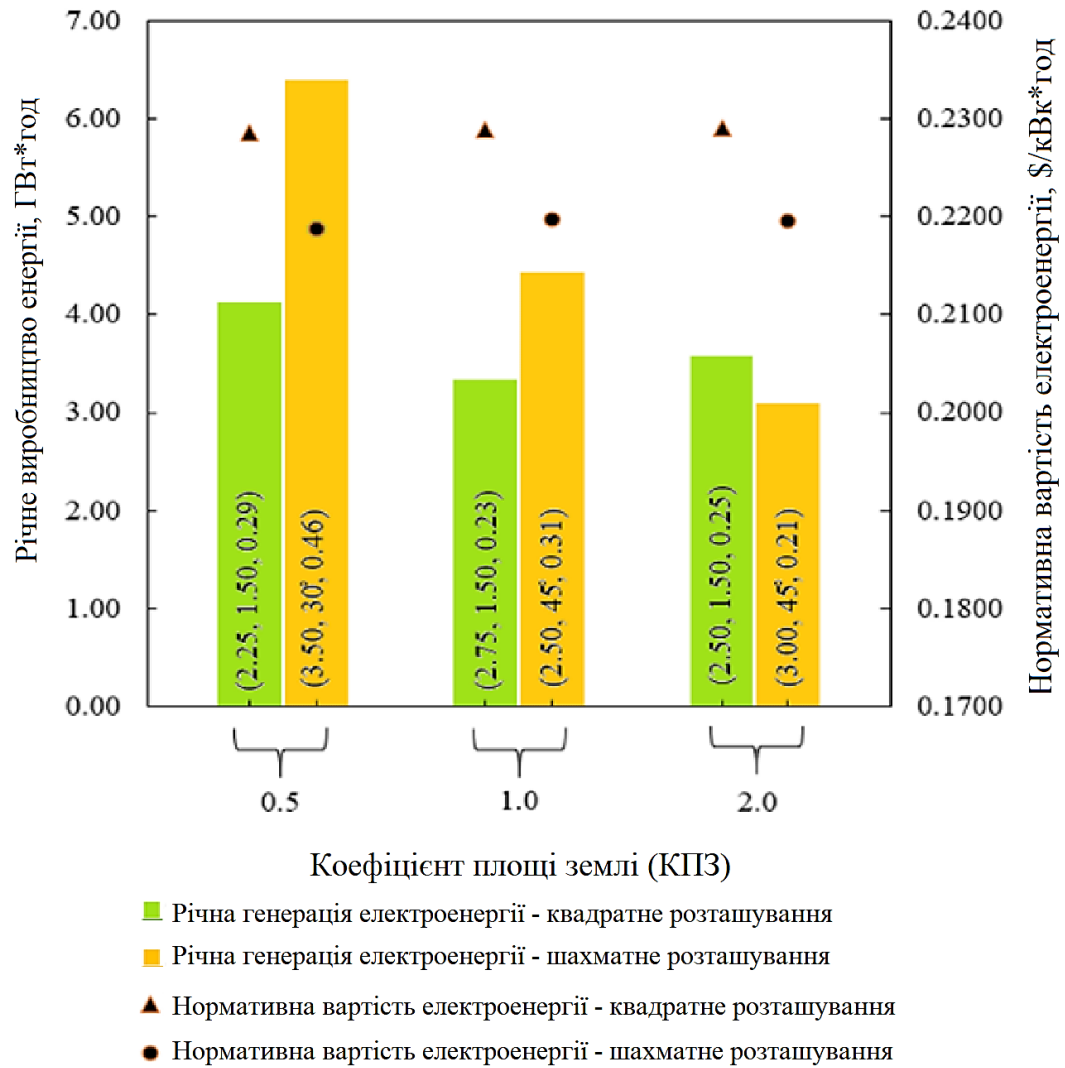


Рисунок 3.7 - Зв'язок між річним виробництвом енергії, НВЕ, квадратною конфігурацією розташування поля геліостатів (D_{ew}/L , D_{ns}/L , КВЗ) і шаховою конфігурацією розташування поля геліостатів (D_{ew}/L , кут, КВЗ) при різних КПЗ

3.7. Висновки до розділу

У результаті виконаного дослідження отримано науково обґрунтовані результати щодо оптимізації просторового компонування фотоелектричних концентраторних систем з двоосьовим стеженням. На основі проведеного математичного моделювання, геометричного аналізу та економічної оцінки сформульовано такі основні висновки:

1. Встановлено закономірності впливу геометрії розташування систем КФЕ на рівень взаємного затінення. Показано, що міжрядні відстані у напрямках E–W та N–S є визначальними чинниками, які формують річну частку затінених площ. Зменшення D_{ew}/L спричиняє непропорційне зростання затінення, що підтверджує домінуючу роль азимутального компонента в умовах двоосьового наведення.
2. Визначено залежності річного виробітку електроенергії від параметрів міжрядного простору. Збільшення D_{ew}/L та D_{ns}/L знижує втрати від затінення та підвищує генерацію окремої системи, однак зменшує сумарний вихід енергії з одиниці площі. Отримано кількісну оцінку інженерного компромісу між щільністю розташування обладнання та його індивідуальною продуктивністю.
3. Сформульовано оптимальні параметри компоновки для квадратного та шахового поля геліостатів. На основі аналізу нормативної вартості електроенергії встановлено, що оптимальні значення D_{ew}/L та D_{ns}/L для квадратного компоновки становлять 2,75 та 1,50 відповідно. Для шахового компоновки оптимальними є $D_{ew}/L = 2,50$ та кут зсуву $\theta = 45^\circ$. Доведено, що шахова схема характеризується нижчими значеннями НВЕ та забезпечує кращий розподіл сонячних потоків.
4. Доведено важливість урахування крайового ефекту у великих полях геліостатів КФЕ. Включення крайових систем до моделі збільшує розраховану річну генерацію на $\approx 30\text{--}31\%$, що унеможливорює застосування спрощених моделей без граничних елементів при розв'язанні оптимізаційних задач.
5. Встановлено залежність оптимальних параметрів компоновки від вартості земельних ресурсів. Показано, що зі зростанням вартості землі оптимальні міжрядні відстані зменшуються, що зумовлено переорієнтацією мінімізації НВЕ з енергетичного на площинний фактор. Відповідно, вартість землі є критично важливим економічним параметром у проєктуванні СЕС.

6. Проаналізовано вплив коефіцієнта пропорційності земельної ділянки на оптимізацію поля геліостатів. Встановлено, що при різних значеннях КПЗ оптимальні конфігурації D_{ew}/L та θ змінюються, що підтверджує необхідність врахування КПЗ як фундаментального параметра під час інженерного проєктування сонячних електростанцій.
7. Аргументовано перевагу шахового компонування над квадратним. У всіх досліджених сценаріях шахова структура забезпечує нижчу собівартість енергії та менший рівень затінення. Це підтверджує її ефективність з позицій геометричного, оптичного та економічного аналізу.

Загалом проведене дослідження розширює наукові уявлення про вплив просторової геометрії фотоелектричних полів геліостатів на їх енергетичну та економічну ефективність. Розроблена методика може бути використана як інженерна основа для оптимізації промислових сонячних електростанцій з двоосьовими системами стеження та сприяти зниженню нормативної вартості електроенергії в реальних проєктах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [32].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві.

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами

або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних

об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [32]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних

частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;
- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;
- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;
- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

4.3 Стійкість роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної і світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мінімальні терміни [33].

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

- надійність захисту робітників та службовців;
- спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);
- надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);
- стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;
- підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

- укриття людей в захисних спорудах;
- проведення евакуаційних заходів;
- радіаційно-хімічний захист;
- медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкцій об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

- а) підвищення стійкості електрозабезпечення:
 - розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;

- закінчення електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;

- створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

- водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;

- захист вододжерел та резервуарів чистої води;

- створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

в) підвищення стійкості систем газу, тепло- та паливо- забезпечення:

- розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;

- газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;

- встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

- максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;

- проведення профілактичних протипожежних заходів;

- підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);

- забезпечення ПУ засобами зв'язку;

- використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискореного (негайного) відновлення порушеного виробництва;

- розробка необхідної технічної та технологічної документації;

- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;

- розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;
- визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;
- висока підготовка керівного складу;
- своєчасне прийняття вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків НС.

Інженерно-технічні заходи - це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунально-енергетичних, систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО при захисті робітників і службовців, проведенні РіНР, відновленні виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу оптимізації просторового розташування двовісних концентраторних фотоелектричних (КФЕ) систем з метою мінімізації взаємного затінення та зниження нормативної вартості електроенергії (НВЕ). Досягнення поставленої мети підтверджується такими основними результатами:

1. Розроблено обчислювальний алгоритм для моделювання взаємного затінення між панелями КФЕ систем з двовісним відстеженням Сонця. Застосування алгоритмів координатних перетворень та методики «промінь/площина» дозволило здійснити просторово-точне моделювання орієнтації панелей та отримати кількісну оцінку миттєвої тіні на їх поверхнях.

2. Обґрунтовано використання НВЕ як основного економічного критерію оптимізації. На основі розрахунків визначено економічно доцільні конфігурації, що забезпечують мінімізацію витрат на одиницю генерованої електроенергії.

3. Встановлено оптимальні параметри розташування панелей, виходячи з мінімального значення НВЕ:

- Для квадратного компонування оптимальні значення співвідношень міжрядного простору становлять: $D_{ew}/L = 2,75$ та $D_{ns}/L = 1,50$.
- Для шахового () компонування оптимальними визначено: $D_{ew}/L = 2,50$ та кут зсуву $\theta = 45^\circ$.

4. Доведено перевагу шахової схеми розташування КФЕ систем над квадратним компонуванням. Шахова структура забезпечує нижчі значення НВЕ та кращий розподіл сонячних потоків, підтверджуючи її ефективність з геометричної, оптичної та економічної точок зору.

5. Аргументовано необхідність урахування крайового ефекту у моделях великих панелей КФЕ. Включення крайових елементів збільшує розраховану річну генерацію на 30-31 %, що виключає можливість використання спрощених моделей без граничних елементів в оптимізаційних задачах проєктування.

6. Визначено вплив ключових економічних та геометричних факторів на оптимізацію розташування панелей:

- Зі зростанням вартості земельних ресурсів оптимальні міжрядні відстані зменшуються, що переорієнтовує процес мінімізації НВЕ з енергетичного на площинний фактор.
- Зміна коефіцієнта пропорційності ділянки (КПЗ) впливає на оптимальні конфігурації D_{ew}/L та кута θ підтверджуючи необхідність врахування КПЗ як фундаментального параметра при інженерному проєктуванні СЕС.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці комплексної методики для оптимізації проєктування сонячних полів КФЕ-систем, яка інтегрує математичне моделювання затінення, точне відстеження Сонця та економічну доцільність (НВЕ), і може бути використана інженерами та дослідниками для зниження інвестиційного рівня промислових сонячних електростанцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294
4. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
5. Ensuring the energy efficiency of heat supply energy systems functioning by justifying the choice of glazing units for the external enclosing structures of buildings / Vadym Koval, Myroslav Zin, Liubov Kostyk, Oleh Buniak // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 110. — No 2. — P. 57–67
6. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and

information technologies 2021, 2021

7. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19. — (Electrical engineering and power electronics)

8. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53

9. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173

10. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.

11. Білоус П.В. Енергоефективність генерування тепла та електроенергії на міні-тес //П.В. Білоус, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 105-106 с.

12. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

13. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук //

Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139

14. Chong, K. K., & Wong, C. W. (2009). General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. *Solar Energy*, 83(3), 298-305.

15. Abdallah, S. (2004). The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. *Energy conversion and management*, 45(11-12), 1671-1679.

16. Gómez-Gil, F. J., Wang, X., & Barnett, A. (2012). Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 306-313.

17. Chong, K. K., & Tan, M. H. (2012). Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field. *International Journal of Photoenergy*, 2012(1), 908364.

18. Perpiñán, O. (2012). Cost of energy and mutual shadows in a two-axis tracking PV system. *renewable energy*, 43, 331-342.

19. Fartaria, T. O., & Pereira, M. C. (2013). Simulation and computation of shadow losses of direct normal, diffuse solar radiation and albedo in a photovoltaic field with multiple 2-axis trackers using ray tracing methods. *Solar Energy*, 91, 93-101.

20. Cumpston, J., & Pye, J. (2014). Shading and land use in regularly-spaced sun-tracking collectors. *Solar energy*, 108, 199-209.

21. Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9), 4470-4482.

22. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

23. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81

24. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval, Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.

25. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

26. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

27. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336

28. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)

29. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи

фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

30. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .

31. Díaz-Dorado, E., Cidrás, J., & Carrillo, C. (2017). A method to estimate the energy production of photovoltaic trackers under shading conditions. *Energy Conversion and Management*, 150, 433-450.

32. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

33. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.