

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*І. Р. Ващишак, В. С. Цих*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504708,  
e-mail: tvs.vitalik@gmail.com*

*Актуальність роботи зумовлена доцільністю підвищення енергетичної ефективності сонячних електростанцій шляхом застосування концентраторів сонячної енергії. Досліджено шляхи підвищення енергоефективності сонячних панелей за допомогою системи спрямовуючих дзеркал, плоских лінз Френеля, сферичних концентраторів та трекерів. Встановлено, що найбільш оптимальним способом підвищення енергоефективності сонячних панелей є застосування недорогих трекерів простої конструкції. Здійснено аналіз відомих типів сонячних панелей, які відрізняються за матеріалами, з яких виготовлено їх елементи, та коефіцієнтами корисної дії – залежністю енергії, виробленої фотоелементом, до інтенсивності сонячного випромінювання на одиницю його поверхні, та підібрано тип сонячних панелей за критерієм «ціна-якість». Розроблено конструкцію трекера для відстежування кута нахилу сонячних панелей за метою підвищення їх енергоефективності. Розраховано генерацію електричної енергії запропонованою сонячною електростанцією за допомогою онлайн-калькулятора. Спрогнозовано зменшення втрат при генеруванні електроенергії даної електростанції за рахунок використання трекера порівняно з фіксованою енергосистемою при однаковій кількості сонячних панелей. З метою здешевлення трекера пропонується під час встановлення відразу орієнтувати його на південь, а кути нахилу змінювати двічі на рік (на початку квітня та наприкінці серпня). Енергоефективність електричної станції розраховано в два етапи: на першому етапі – кількість електроенергії від сонячних панелей на рік при регулюванні лише кута нахилу панелей на південь; на другому етапі – із врахуванням підвищення енергоефективності сонячної електростанції при застосуванні трекерної системи. Розрахована генерація електроенергії запропонованої сонячної електростанції з трекером підтвердила ефективність та доцільність використання спроектованої трекерної системи. Застосування спроектованої трекерної системи дає змогу підвищити енергоефективність сонячних панелей у середньому на 25 %.*

**Ключові слова:** електропостачання, енергетична ефективність, сонячна енергія, сонячна панель, трекер.

*Актуальность работы обусловлена целесообразностью повышения энергетической эффективности солнечных электростанций путем применения концентраторов солнечной энергии. Исследованы пути повышения энергоэффективности солнечных панелей с помощью системы направляющих зеркал, плоских линз Френеля, сферических концентраторов и трекеров. Установлено, что наиболее оптимальным способом повышения энергоэффективности солнечных панелей является применение недорогих трекеров простой конструкции. Проведен анализ известных типов солнечных панелей, отличающихся материалами, из которых изготовлены их элементы, и коэффициентами полезного действия – зависимостью энергии, произведенной фотоэлементом, к интенсивности солнечного излучения на единицу его поверхности, и подобран тип солнечных панелей по критерию «цена-качество». Разработана конструкция трекера для отслеживания угла наклона солнечных панелей с целью повышения их энергоэффективности. Рассчитана генерация электрической энергии предложенной солнечной электростанцией с помощью онлайн-калькулятора. Спрогнозировано уменьшения потерь при генерировании электроэнергии данной электростанции за счет использования трекера по сравнению с фиксированной энергосистемой, при одинаковом числе солнечных панелей. С целью удешевления трекера предлагается установлению его сразу ориентировать при на юг, а углы наклона менять два раза в год (в начале апреля и в конце августа). Расчет энергоэффективности электростанции проведен в два этапа: на первом этапе рассчитано количество электроэнергии за год, которое можно получить от солнечных панелей при регулировании только угла наклона панелей на юг, на втором этапе - учитывая повышение энергоэффективности солнечной электростанции при применении трекерной системы. Рассчитанный объем генерации электроэнергии предложенной солнечной электростанции с трекером подтвердил эффективность и целесообразность использования спроектированной трекерной системы. Применение спроектированной трекерной системы позволяет повысить энергоэффективность солнечных панелей в среднем на 25%.*

**Ключевые слова:** электроснабжения, энергетическая эффективность, солнечная энергия, солнечная панель, трекер.

The urgency of the work is due to the feasibility of increasing the energy efficiency of solar power plants through the use of solar energy concentrators. Ways to improve the energy efficiency of solar panels using a system of directional mirrors, flat Fresnel lenses, spherical concentrators and trackers have been investigated. It is established that the most optimal way to improve the energy efficiency of solar panels is to use inexpensive trackers with a simple design. The analysis of known types of solar panels, which differ in materials from which their elements are made, and the coefficients of efficiency – dependence of energy produced by a photocell on the intensity of solar radiation per unit of its surface has been carried out, and the type of solar panels by the criterion “price-quality” has been selected. A tracker design has been developed to track the angle of inclination of solar panels to increase efficiency. The electricity generated by the proposed solar power plant was calculated using an online calculator. It is projected to reduce losses when generating electricity for a given power plant due to the use of a tracker compared to a fixed power system, with the same number of solar panels. In order to reduce the cost of the tracker, it is suggested to orientate it to the south at once, and to change the inclination angles twice a year (in early April and late August). The energy efficiency of the power plant is calculated in two stages. At the first stage the amount of electricity from solar panels per year when adjusting only the angle of inclination of the panels to the south is calculated. At the second stage energy efficiency of the power plant is calculated taking into account the increase of energy efficiency of the solar power plant when using the tracker system. The calculated electricity generation of the proposed solar power plant with tracker confirmed the efficiency and feasibility of using the designed tracker system. The application of the designed tracker system allows to increase the energy efficiency of solar panels by an average of 25%.

Keywords: power supply, energy efficiency, solar energy, solar panel, tracker.

### Вступ

Сучасний розвиток світової економіки невід’ємно пов’язаний із зростанням темпів виробництва енергії. Це зумовлюється багатьма факторами: загальним збільшенням світового товаровиробництва, розвитком транспорту та телекомунікацій, розробкою віддалених родовищ корисних копалин, утилізацією відходів, ростом споживання енергії у побуті (опалення, освітлення, живлення побутової техніки) тощо.

Однією з основних тенденцій розвитку сучасного паливно-енергетичного комплексу є пошук і впровадження альтернативних видів джерел енергії та намагання відмовитись від джерел енергії, які екологічно та вибухонебезпечні (ГЕС, АЕС, ТЕС). Ця інновація спрямована, передусім, на зменшення витрат промислових підприємств та побутових споживачів на опалення чи освітлення шляхом впровадження системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як теплоенергетичного, так і фотоенергетичного обладнання практично на всій території.

Однак, порівняно невисокий коефіцієнт корисної дії сонячних панелей і вартість сонячних систем уповільнюють їхнє поширення. Застосування концентраторів енергії дає можливість підвищити ефективність сонячної станції.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Для підвищення ефективності сонячної станції застосовують різні концентратори енергії – системи спрямовуючих дзеркал, лінзи Френеля та трекеери.

Одним з перспективних шляхів підвищення енергетичного виходу фотоелектричних перетворювачів є використання системи дзеркал, що створюють додатковий оптичний потік на поверхню сонячних панелей із незадіяних освітлених сонячним випромінюванням площ.

Основна ідея використання дзеркал полягає у збільшенні потоку сонячного випромінювання більше за стандартні умови за інтенсивністю ( $1000-1200 \text{ Вт/м}^2$ ), що дозволить підвищити енергетичний виробіток сонячних панелей.

Для цього, враховуючи вимоги щодо надійності, технологічності та простоти конструкції, можна розміщувати дзеркала попереду сонячних панелей (рисунок 1) так, щоб забезпечувалося скеровування сонячного випромінювання за рахунок його відбивання з невикористаних під панелі площ [1].

Основними труднощами на шляху застосування цього способу є:

1) збільшення площі сонячної станції за рахунок додаткового віддалення рядів сонячних панелей;

2) перевищення номінальної інтенсивності вище стандартних умов ( $800-1000 \text{ Вт/м}^2$ ), що може призвести до посилення ефекту деградації кремнію в сонячних панелях та зменшення їх терміну служби. Цей спосіб вимагає використання панелей якісного виробництва із значним запасом витривалості.

Авторами в [1] проведено експериментальні дослідження використання додаткових дзеркал на малій сонячній PV-комірці (PV-cell). В експерименті використовувалась фотогальванічна сонячна комірочка з номінальною напру-

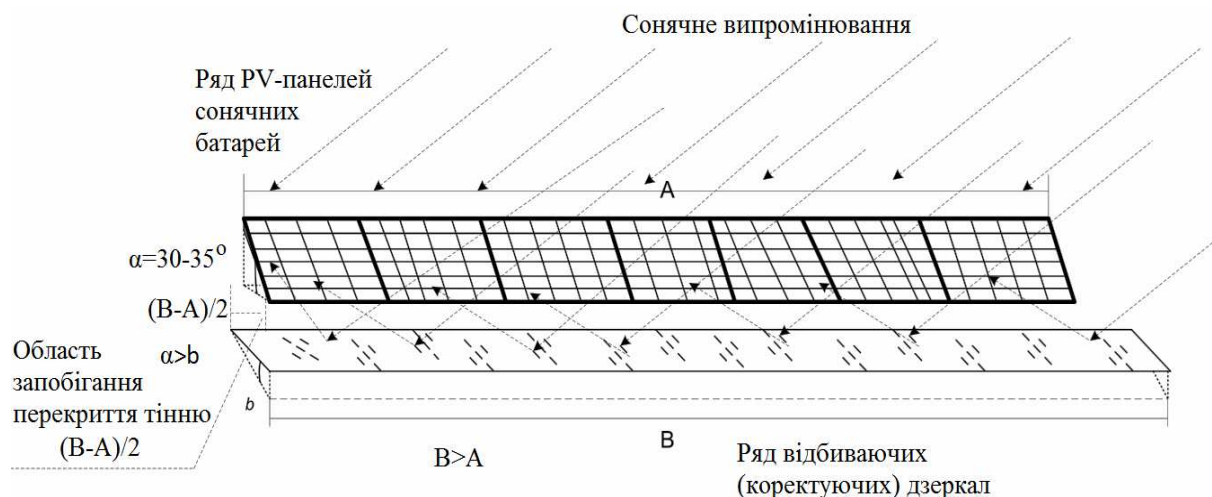
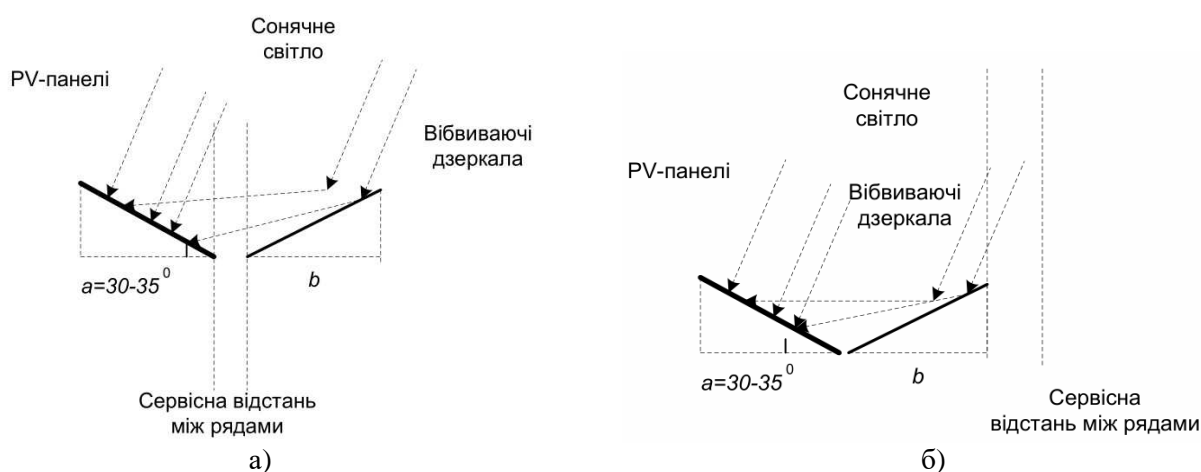


Рисунок 1 – Розміщення дзеркал перед сонячними панелями для підвищення їх енергоефективності



$a$  – з великою сервісною відстанню між рядами,  $b$  – з малою сервісною відстанню

Рисунок 2 – Конструкція з розміщеними дзеркалами для збільшення ефективності вироблення сонячних фотогальванічних PV-панелей

гою 2,5 В і площею 25 см<sup>2</sup>. В процесі досліджень дзеркала розміщувались, як показано на рисунку 2,а. В ході експерименту змінювалась сервісна відстань між рядами (рисунку 2,б).

Вимірювання вихідної електричної потужності показали, що додаткові дзеркала дозволяють підвищити вихідну енергію від сонячної PV-комірки на 35-60%. Однак, при цьому суттєво зростала температура на поверхні комірки. Також, складною задачею залишається правильне і чітке позиціонування дзеркала, для запобігання виходу відбитого ним випромінювання поза межі PV-комірки.

Отже, застосування системи дзеркал дозволяє підвищити кількість отриманої енергії від сонячних панелей, однак тільки тих, що розраховані на високу температуру. Крім того, застосування системи дзеркал вимагає відведення додаткових площ під їх розміщення, що не завжди є можливим і доцільним.

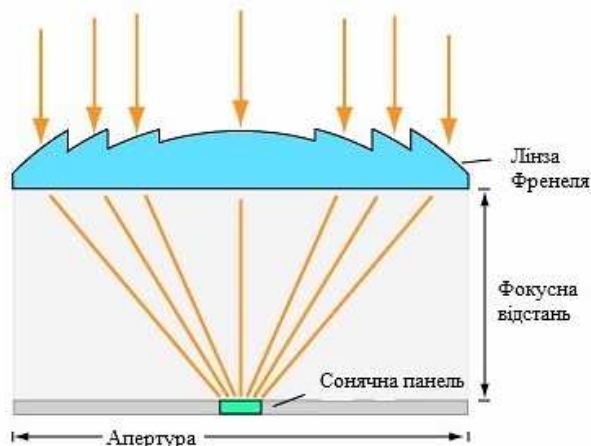
Тому, для існуючих сонячних панелей великої потужності і значної площі, розрахованих на незначні температури, такий спосіб є мало-ефективним.

Для ефективного збору сонячної енергії можуть використовуватися сонячні концентратори на основі сферичних лінз або так званих плоских лінз Френеля [2].

За рахунок розміщення на сонячній батареї цього типу лінз до 8 разів підвищується концентрація світлового потоку. Це дає змогу зменшити розміри фотоелементів сонячних батарей.

Варіант застосування плоских лінз Френеля для роботи сонячної електростанції наведено на рисунку 3. Однак, як видно з рисунка, на сонячну панель падає сфокусоване сонячне проміння, що різко підвищує температуру на поверхні панелі. Тому для нормальної роботи сонячної панелі потрібно організувати ефективне тепловідведення від її поверхні. А, враховуючи

те, що температура у місці фокусу лінзи Френеля може сягати 500 °С, це зробити доволі важко.



**Рисунок 3 – Концентратор сонячного випромінювання на лінзі Френеля**

Застосувати на практиці плоскі лінзи Френеля можна як у конструкції, показаної на рисунку 4, де застосовано спеціально сконструйовані високотемпературні фотомодулі з потужними радіаторами повітряного охолодження. Лінзи Френеля та фотомодулі з радіаторами розміщено в герметичних боксах. Щоб забезпечити розміщення фотомодулів у фокусі лінз протягом всієї світлої частини дня, бокси встановлено на механізмі відслідковування за рухом сонця – трекері.



**Рисунок 4 – Конструкція сонячної електростанції з застосуванням плоских лінз Френеля**

Наведена на рисунку 4 конструкція ефективна для незначних за розмірами фотомодулів, які поки знаходяться на стадії досліджень.

Дослідимо можливість застосування лінз Френеля для підвищення енергоефективності існуючих сонячних панелей великої потужності встановлених стаціонарно. Сучасні сонячні панелі великої потужності мають вихідну потужність від 200 до 320 Вт і значні розміри. Крім того, вони можуть ефективно працювати при доволі незначних температурах (до 45-50°С).

Але з підвищенням температури поверхні енергоефективність сонячних панелей починає зменшуватись. Тому їх можна розміщувати не у фокусі лінзи, а вище, де температура не така значна, наприклад, як показано на рисунку 5. З рисунка видно, що для того, щоб на сонячну панель потрапляли сонячні промені під різними кутами, розміри лінзи Френеля повинні бути суттєво більші за розміри сонячної панелі. Це пов'язано зі зміщенням фокусу лінзи залежно від кута падіння променів. Наприклад, для випадку на рисунку 5, коли сонячні промені падають під кутом 45° на поверхню стаціонарно встановленої панелі і при цьому освітлюється ще уся її площа, площа лінзи Френеля повинна бути на 50% більша за площу панелі. На стільки ж мала б теоретично піднятися і енергоефективність панелі. Однак, за рахунок зменшення енергоефективності панелі від підвищення температури, а також за рахунок того, що при куті падіння променя, відмінному від 90° зміщується фокус лінзи, і в ній виникають спотворення, що проявляються у частковому затемненні певних ділянок панелі, то підвищення енергоефективності сягатиме не більше 25%.

Розміщення лінзи Френеля 1, закріпленої за допомогою профілю 2 над сонячною панеллю 3, зображено на рисунку 6. Однак, реалізувати такий варіант доволі складно, оскільки великі лінзи Френеля тільки почали випускати, а внаслідок того, що вони виготовляються з пластику, актуальним залишається питання їх жорсткого закріплення над панеллю, яке б виключало можливість деформування лінзи.

Одним з варіантів вирішення цього питання може бути застосування замість однієї великої лінзи декількох, менших за розміром. Для аналізу доцільності цього варіанту розглянемо застосування в якості концентраторів лінз Френеля для сонячних панелей розміром 520×520 мм з фокусною відстанню 620 мм [3]. Лінзи 1 можна розмістити на кріпленнях 2 над панеллю 3, як показано на рисунку 7.

Розглянемо роботу лінз на прикладі сонячної панелі розмірами 1,64×0,99 м. Розрахункова схема для визначення ефективно освітлювальної площі панелі наведена на рисунку 8. З довшої сторони панелі розміщується 4 лінзи 1 з фокусними відстанями 2, скріплені між собою, для отримання жорсткої конструкції, кріпленнями 3. Набір лінз розміщено над сонячною панеллю 4.

На відміну від суцільної лінзи, набір лінз має переваги і недоліки. Перевагами є можливість забезпечення жорсткості конструкції, легкість заміни лінз і їх невисока вартість.

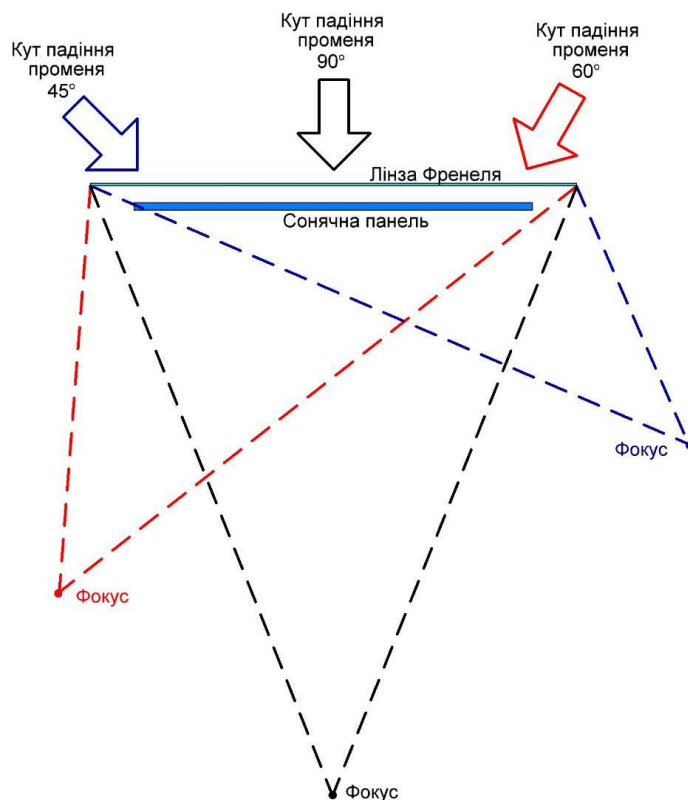
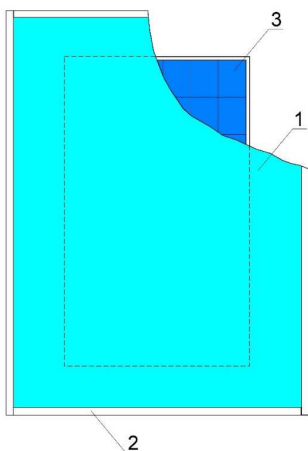
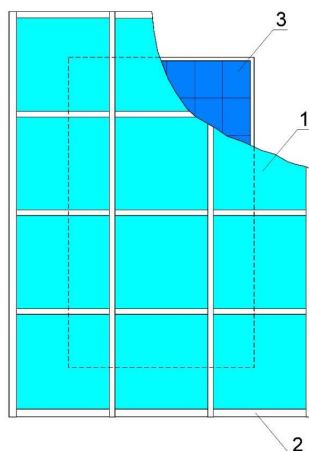


Рисунок 5 – Ефективність лінзи Френеля при різних кутах падіння сонячного променя на поверхню панелі



1 – лінзи Френеля, 2 – профіль, 3 – сонячна панель

Рисунок 6 – Розміщення лінзи Френеля над сонячною панеллю



1 – лінзи Френеля, 2 – профіль, 3 – сонячна панель

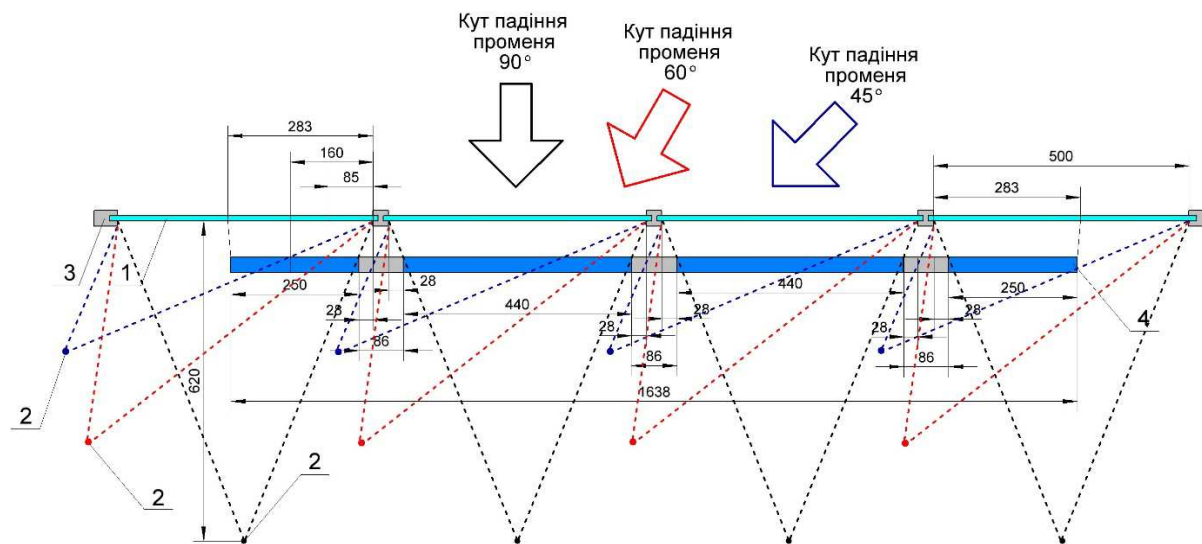
Рисунок 7 – Розміщення набору лінз Френеля над сонячною панеллю

Основний недолік полягає у тому, що частина панелі через тінь від елементів кріплення лінз залишається неосвітленою. При цьому, чим менший кут падіння сонячних променів, тим частина неосвітленої площі панелі більша внаслідок зсуву фокусів лінз 2. Навіть при прямому падінні сонячних променів енергоефективність панелі з набором лінз зростає не більше, ніж на 5%. Коли ж кут падіння променів становитиме  $45^\circ$ , то енергоефективність панелі на-

віть зменшиться у порівнянні з її ефективністю без лінз на 30%.

Все наведене вказує на те, що фокуруючі пристрої на основі лінз Френеля для панелей великої площі можна застосовувати тільки за наявності механізму повороту панелей за сонцем.

Ще одним видом концентраторів сонячного проміння є сферичні концентратори (рисунок 9) [2]. Їх основною перевагою є здатність



1 – лінзи Френеля, 2 – фокусна відстань, 3 – кріплення, 4 – сонячні панелі

**Рисунок 8 – Розрахункова схема для визначення ефективно освітлювальної площі сонячної панелі лінзами Френеля**

ефективно вловлювати сонячне світло під будь-якими кутами. Це дає можливість зекономити кошти на придбання пристроїв слідкування за сонцем. Крім того, сферичні концентратори працюють і вночі від місячного світла. На даний час отримане практичне підвищення енергоефективності фотоелементів за допомогою сферичних концентраторів на рівні 27%.



**Рисунок 9 – Вигляд сферичних концентраторів**

Але, оскільки для сферичних концентраторів потрібні фотоелементи малих розмірів, то застосовувати їх для підвищення енергоефективності великих панелей недоцільно.

Для генерування максимальної потужності сонячні батареї слід орієнтувати під певним кутом до поверхні Землі, по можливості перпендикулярно до світла. На жаль, в більшості випадків, сонячні батареї встановлюють на фіксовані конструкції на даху будинку або на землі, при цьому кут падіння сонячних променів постійно змінюється, як протягом дня, так і про-

тягом року – Земля рухається навколо Сонця, що призводить до сезонних змін кута падіння світла.

Взимку світло падає на землю під значно меншим кутом, ніж влітку, тому для забезпечення ефективної генерації електроенергії, панелі повинні бути розташовані під великим кутом до поверхні землі. Крім того, це дозволяє сонячним панелям поглинати енергію світла, відбитого від снігу, а також вирішує для північних країн проблему снігу, що накопичується на панелях – при великих кутах він просто не затримується. Влітку навпаки – чим менший кут, тим краще.

Також великий вплив робить азимут установки сонячних панелей. При стаціонарній установці оптимальним є розміщення сонячних панелей на південь.

Для стеження сонячних панелей за Сонцем застосовують трекари. Завдання трекара – встановити кути нахилу робочої поверхні панелі, зорієнтувавши її на Сонці. В цьому випадку сонячні промені спрямовані у напрямку, перпендикулярному до площини сонячної панелі.

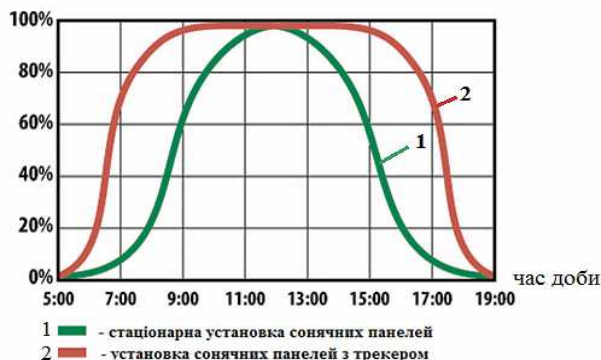
Рухома частина трекара може змінювати своє положення за допомогою двох актуаторів – виконавчих пристроїв, виконаних на електродвигунах.

Для досягнення цієї мети застосовуються спеціальний давач, обладнаний фотоприймачами. Вони отримують дані про стан сонця і допомагають орієнтувати потрібним чином фотоелементи.

Пристрій управління актуаторами за допомогою давача аналізує освітленість при різних

положеннях трекера і передає сигнали на актуатори до моменту, коли потік світла на всіх фотоелементах буде однаковим. Розбалансування системи через рух Сонця дасть імпульс для активації нового переміщення, в напрямку до Сонця.

На рисунку 10 наведено результати порівняння виробленої потужності протягом світлового дня стаціонарно встановлених сонячних панелей та панелей із застосуванням трекера [4].



**Рисунок 10 – Графіки роботи стаціонарно встановлених сонячних панелей та панелей з трекером**

Застосування трекерів має кілька переваг.

Першою перевагою є те, що загалом вони можуть дати приріст у виробленні електроенергії до 50 – 55%.

Перевага друга: протягом дня сонячні панелі нагріваються, і вироблення ними енергії зменшується на 10% і більше. Тому дуже важливо "зібрати" енергію сонця в першій половині дня, коли панелі не нагрілися до рівня значних втрат вироблення. Трекер допомагає в цьому, так як дає можливість ефективного вироблення електроенергії на північному сході і на південному сході в ранкові години. Взимку даний фактор менш актуальний через природне охолодження.

Перевага третя: сонячний трекер займає мало місця на земельній ділянці. Наприклад, сонячний трекер UST-AADAT потужністю 15 кВт має опорну поверхню 12,56 м<sup>2</sup>. Фіксована система тієї ж потужності займає площу не менше 150 м<sup>2</sup>.

Перевага четверта: сонячний трекер взимку не треба чистити від снігу і льоду. У фіксованій системі цього не уникнути, а швидко позбутися від наслідків крижаного дощу неможливо, тим більше запобігти пошкодженню панелей.

Перевага п'ята: фіксовані системи не захищені від руйнування і псування ураганом, важ-

кими опадами (сніг, град, лід). Вбудована в сонячний трекер метеостанція вирішує дану проблему переорієнтацією трекера для мінімізації втрат від несприятливих факторів.

### Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття

Електропостачання об'єкта від сонячної станції потребує ретельної розробки проєкту перед початком монтажу. Доцільно підібрати комплект необхідного обладнання ще до початку монтажу, щоб розрахувати і встановити сонячну систему з найбільшим потенціалом.

На основі проведених теоретичних досліджень встановлено, що найбільш оптимальним способом підвищення енергоефективності сонячних панелей є застосування трекерів.

Основним чинником, який обмежує широке застосування трекерів є їхня вартість. Тому, доцільним є проєктування недорогого трекера з максимально простою конструкцією замість використання дорогих фабричних систем.

### Формулювання цілей статті

Мета роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі в галузі енергетичного менеджменту – підвищення енергоефективності сонячної електростанції шляхом застосування трекерів.

### Висвітлення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням одержаних наукових результатів

Сонячні панелі, які перетворюють енергію сонця в електричну енергію, є основними елементами сонячної електростанції. Від їх якості насамперед залежить стабільність і надійність роботи всієї електростанції.

В даний час найбільш розповсюдженими є п'ять типів сонячних панелей, які відрізняються за матеріалами, з яких виготовлені їх елементи, та коефіцієнтами корисної дії – залежністю енергії, виробленої фотоелементом до інтенсивності сонячного випромінювання на одиницю його поверхні [5].

Після аналізу різних сонячних панелей за критерієм ціна–якість, вибрано панелі типу EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A з такими основними характеристиками [6]:

- тип панелей – полікристалічні;
- коефіцієнт корисної дії – 20,55 %;
- номінальна потужність – 300 Вт;
- напруга при макс. потужності – 32,94 В;
- струм при макс. потужності – 9,09 А;
- розміри однієї панелі: 1639×989×45 мм;
- вага однієї панелі – 22 кг;



**Рисунок 11 – Зовнішній вигляд сонячної панелі EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A**

– збереження вихідної потужності до 90% протягом 10 років експлуатації і до 80% протягом 25 років експлуатації.

Фотоелектричні модулі панелі EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A виготовляються з високоякісних матеріалів. Корпус модуля виконаний з алюмінію, а кремній захищений каленим склом товщиною 3,2 мм, що забезпечує стійкість від граду, вітру і снігу.

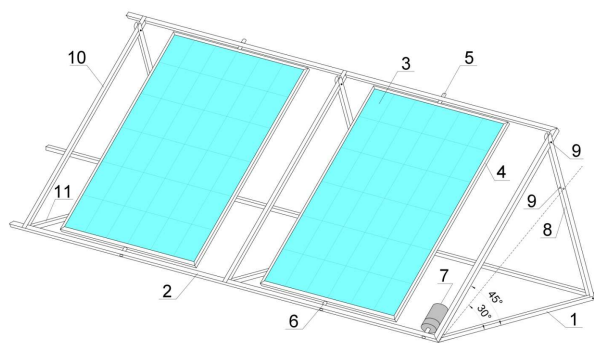
Характеристики панелей наведені для температури +25°C. При інших температурах характеристики панелей типу EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A дещо змінюються [6]: при температурах нижче +25°C вони покращуються, а у випадку вище +25°C – погіршуються.

Зовнішній вид сонячних панелей типу EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A наведено на рисунку 11. Для створення електростанції візьмемо 40 панелей типу EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A з сумарною потужністю 12,0 кВт, що є доволі зручним для її технічної реалізації.

Трекери підвищують енергоефективність сонячних панелей за рахунок орієнтації їх так, щоб сонячні промені протягом світлого періоду доби падали на поверхні панелей під прямим кутом.

Тому пропонується створити трекер, який би міг працювати з високою ефективністю, але простий і дешевий.

Трекер складатиметься з двох рам, виготовлених зі сталюого швелеру (рисунок 12). Рама 1 слугитиме опорою і стоятиме на землі, а рама 2 повертатиметься відносно неї на шарнірах. У раму 2 вмонтовується 8 сонячних панелей 3 (на рисунку 3.4 показано 2 з 8) в рамках 4 зі сталюними осями 5 та 6, розміщеними зверху та внизу рамок. Відносно цих осей панелі 3 мають



**Рисунок 12 – Зовнішній вигляд трекера для сонячних панелей**

змогу повертатись у вертикальній площині. Для повороту всіх панелей у трекері на однаковий кут на їхніх нижніх осях 6 розміщені зубчасті колеса, з'єднані між собою ланцюговою передачею. Рух ланцюгової передачі забезпечує електродвигун з редуктором 7.

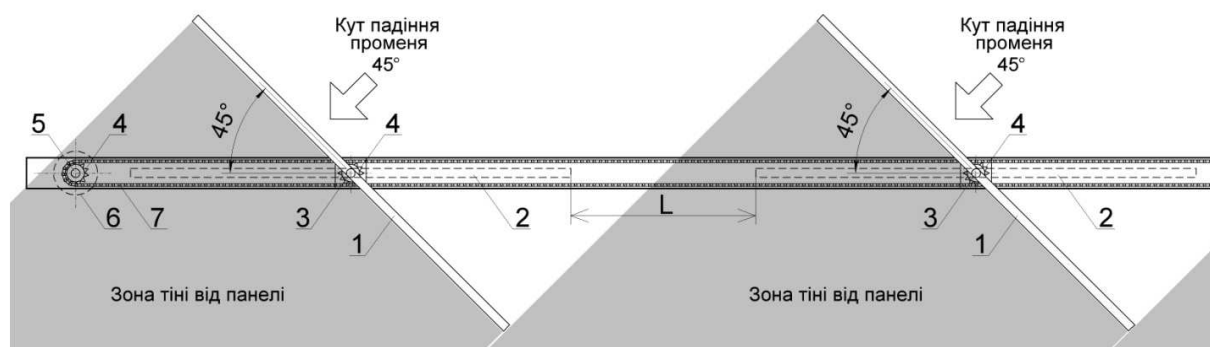
З метою здешевлення трекера, при встановленні його відразу орієнтують на південь, а кут нахилу (30° і 45°) змінюють 2 рази в рік (на початку квітня та в кінці серпня), змінюючи положення рамки з панелями 2 за допомогою фіксаторів 8 з кріпильними отворами 9. Елементи 10 та 11 слугать для підвищення міцності рамки з панелями 2.

Конструкція механізму повороту 2 панелей трекера у вертикальній площині наведена на рисунку 13. Панелі 1 відносно свого положення 2 можуть повертатись на кут 45° вліво та вправо. Кут 45° вибрано з метою мінімізації розмірів трекера. При цьому куті, враховуючи ширину панелі в рамці 1 м і зони тіні від панелей, відстань між центрами панелей  $L$  становитиме 0,42 м. Тоді загальна довжина трекера матиме 11,4 м. Панелі кріпляться до рами трекера за допомогою верхньої та нижньої осей 3. На нижні осі надіті зубчасті колеса 4. Таке ж колесо надіте на вісь 5 електродвигуна з редуктором 6. Поворот усіх зубчастих коліс одночасно на певний кут здійснюється ланцюговою передачею 7.

Простота і надійність такого механізму забезпечать його тривалу безперебійну експлуатацію.

Розрахунок енергоефективності електричної станції проведено в два етапи: на першому етапі розраховано кількість електроенергії на рік, яку можна отримати від сонячних панелей при регулюванні лише кута нахилу на південь;





1 – сонячні панелі (кут  $45^\circ$ ), 2 – сонячні панелі (кут  $0^\circ$ ), 3 – осі кріплення, 4 – зубчасті колеса, 5 – вісь електродвигуна, 6 – редуктор, 7 – ланцюгова передача

Рисунок 13 – Механізм повороту панелей трекера

на другому етапі – із врахуванням підвищення енергоефективності сонячної електростанції при застосуванні трекерної системи.

Результати розрахунку електроенергії, що генерується сонячною електростанцією, є орієнтовними і можуть відрізнятися на  $\pm 5\%$  від фактичних значень. Майбутнє вироблення електроенергії залежить від багатьох чинників як, наприклад, від майбутніх метеоумов її експлуатації. Тому, попередній розрахунок обсягів генерування електроенергії за допомогою сонячної електростанції виконаємо за допомогою онлайн-калькулятора [7].

Для розрахунку ефективності сонячної електростанції визначимо середньоденну генерацію енергії по місяцях, оскільки в даному випадку сонячні панелі доцільно з квітня по серпень розміщувати під кутом  $\beta = 30^\circ$  на південь, а в інші періоди року – під кутом  $\beta = 45^\circ$ . Враховуючи кількість днів у кожному місяці, розраховуємо середньомісячний обсяг генерування електроенергії та визначаємо приблизний загальний обсяг генерації за рік. Результати подамо у вигляді таблиці 1 та рисунку 14.

Приймаємо, що за рік спроектована електростанція при оптимальних умовах може згенерувати 13450 кВт·год електроенергії.

З огляду на те, що втрати, котрі залежать від кута нахилу сонця при використанні сонячного трекера, зменшені до мінімуму, оскільки сонце завжди буде направлено перпендикулярно площині сонячної панелі, можна зробити висновок про більше вироблення енергії енергосистеми з використанням сонячного трекера в порівнянні з фіксованою енергосистемою, при однаковому числі сонячних панелей, на суму розрахованих втрат. Тобто ефективність панелей збільшиться на величину втрат системи без трекера.

В [8] на основі проведених експериментальних досліджень наведено усереднені втрати генерування електроенергії сонячними панелями залежно від кута нахилу до сонця. За цими даними спрогнозовано зменшення втрат при генеруванні електроенергії даної електростанції за рахунок використання трекера (таблиця 2). На основі даних про втрати проведено розрахунок середньомісячного обсягу генерування спроектованої сонячної станції з трекером. Результати наведено в таблиці 3 та у вигляді порівняльної гістограми генерації електроенергії без та з трекером (рисунок 15).

Як бачимо, застосування розробленої трекерної системи з кутами повороту  $-45^\circ \div +45^\circ$  дозволило підвищити енергетичну ефективність запропонованої електростанції на 25%.

### Висновки

Наведено порівняльні дослідження енергоефективності сонячних панелей з застосуванням системи спрямовуючих дзеркал, лінз Френеля та трекерів дали змогу вибрати найоптимальніший варіант за критерієм ціна-ефективність.

Застосування спроектованої трекерної системи дає змогу підвищити енергоефективність сонячних панелей на 25 %.

### Література

1. Кожем'яко В. П., Домбровський О. Г., Жердецький В. Ф., Маліновський В. І., Причуляк Г. В. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики. *Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях*. 2011. С. 141-157.
2. Лінзові сонячні панелі. Плоскі і сферичні [електронний ресурс]. URL: [https://rodovid.me/solar\\_power/linzovye-solnechnye-paneli.html](https://rodovid.me/solar_power/linzovye-solnechnye-paneli.html).

Таблиця 1 – Генерування електроенергії сонячною електростанцією

Місяць	Середньодобовий обсяг генерування, кВт·год	Середньомісячний обсяг генерування, кВт·год
Січень	11,07	343,17
Лютий	18,46	516,88
Березень	34,97	1084,07
Квітень	49,89	1496,70
Травень	61,34	1901,54
Червень	62,58	1877,40
Липень	63,38	1964,78
Серпень	55,02	1705,62
Вересень	38,49	1154,70
Жовтень	24,38	755,78
Листопад	12,70	381,00
Грудень	8,72	270,32
Річне виробництво, кВт·год		13451,96

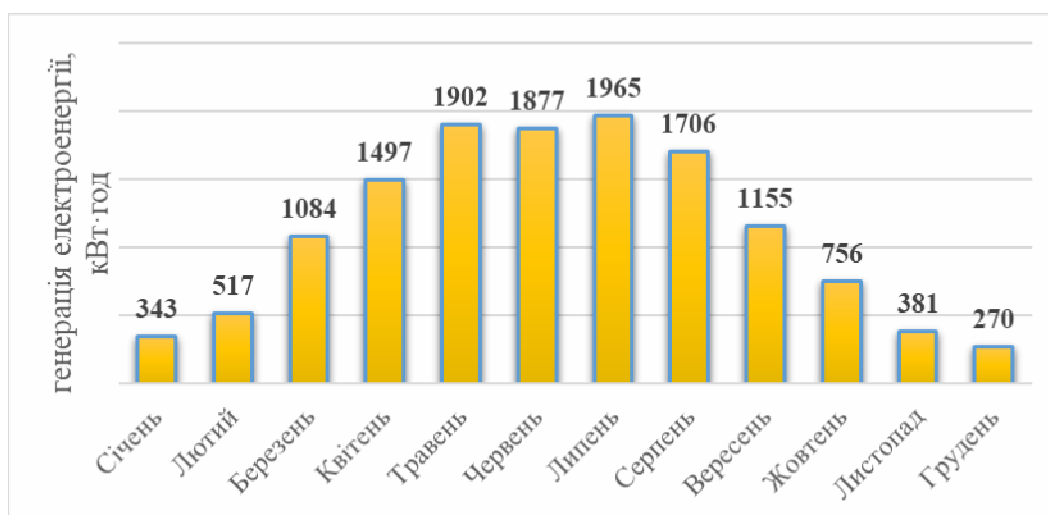


Рисунок 14 – Середньомісячний обсяг генерування електроенергії спроектованою сонячною електростанцією протягом року

Таблиця 2 – Усереднені втрати генерування електроенергії сонячними панелями залежно від кута нахилу до сонця

Кут падіння променів сонця	Втрати без трекера, %	Втрати з трекером, %
180 °	97	90
165 °	92	70
150 °	80	20
135 °	40	5
120 °	16	1
105 °	5	0,5
90 °	0,2	0,2
75 °	5	0,5
60 °	16	1
45 °	40	5
30 °	80	20
15 °	92	70
0 °	97	90

Таблиця 3 – Обсяги генерування електроенергії сонячною електростанцією

Місяць	Середньомісячний обсяг генерування без трекара, кВт·год	Середньомісячний а обсяг генерування з трекером, кВт·год
Січень	343,17	456,42
Лютий	516,88	687,45
Березень	1084,07	1441,81
Квітень	1496,70	1990,61
Травень	1901,54	2529,05
Червень	1877,40	2496,94
Липень	1964,78	2613,16
Серпень	1705,62	2268,47
Вересень	1154,70	1535,75
Жовтень	755,78	1005,19
Листопад	381,00	506,73
Грудень	270,32	359,53
разом	13451,96	17891,11

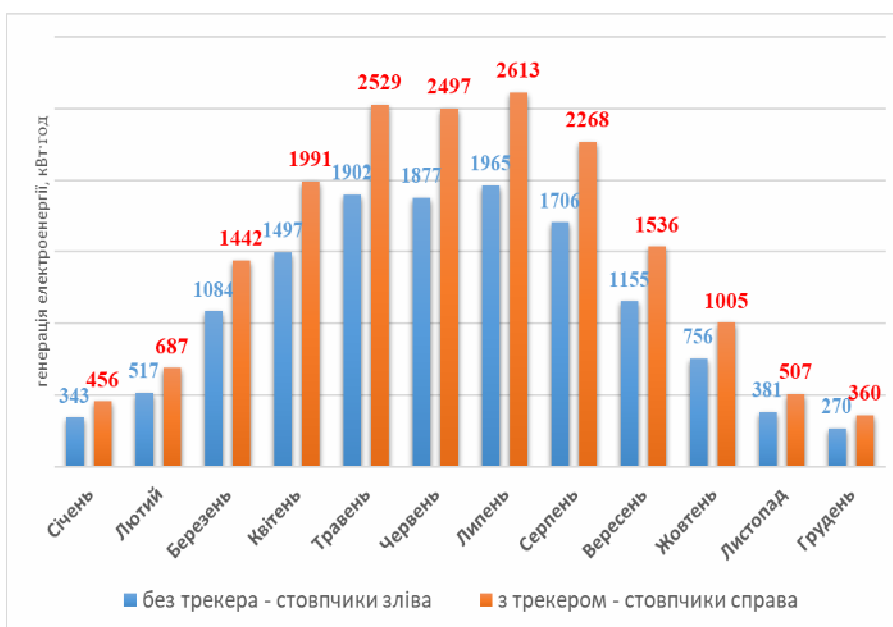


Рисунок 15 – Порівняння генерації електроенергії без та з трекером

3. Лінзи Френеля [електронний ресурс]. URL: <https://aliexpress.com/popular/fresnel-lens.html>.

4. Як розмістити сонячні панелі? [електронний ресурс]. URL: [http://dozor.technopark.by/\\_projects/index.html#x](http://dozor.technopark.by/_projects/index.html#x).

5. Будинок «нуль» енергії... тому що Земля і Сонце не виставляють рахунків: зб. статей [уклад. О.Б. Денис]. Львів : ЕКОін-форм, 2008. 336 с.

6. Сонячна панель EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A, 300 Вт / 24В [електронний ресурс]. URL: <https://energenie.com.ua/katalog/jenergobere-zhenie/1305001.html>.

7. Калькулятор сонячної електростанції [електронний ресурс]. URL: <https://rentchno.ua/ua/solar-calc.html>.

8. Эффективность использования солнечных трекеров (систем ориентации солнечных батарей) [електронний ресурс]. URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/11275/>.

### References

1. Kozhemiako V. P., Dombrovskiy O. H., Zherdetskiy V. F., Malinovskiy V. I., Prytuliak H. V. Analychniy ohliad suchasnykh tekhnolohii fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv dlia soniachnoi enerhetyky. Optyko-elektronni prystroi ta komponenty v lazernykh i enerhetychnykh tekhnolohiiakh. 2011. P. 141-157. [in Ukrainian]

2. Linzovi soniachni paneli. Ploski i sferychni [in Ukrainian]. URL: [https://rodovid.me/solar\\_power/linzovye-solnechnye-paneli.html](https://rodovid.me/solar_power/linzovye-solnechnye-paneli.html).

3. Linzy Frenelia. URL: <https://aliexpress.com/popular/fresnel-lens.html>. [in Ukrainian]
4. Yak rozmistyty soniachni paneli? [in Ukrainian]. URL: [http://dozor.technopark.by/\\_projects/index.html#x](http://dozor.technopark.by/_projects/index.html#x).
5. Budynok «nul» enerhii... tomu shcho Zemlia i Sontse ne vystavliaiut rakhunkiv: zb. statei [uklad. O.B. Denys]. Lviv : EKOin-form, 2008. 336 p. [in Ukrainian]
6. Soniachna panel EnerGenie EG-SP-M300W-33V9A, 300 Vt / 24V [elektronnyi resurs]. [in Ukrainian]. URL: <https://energenie.com.ua/katalog/jenergosbere-zhenie/1305001.html>.
7. Kalkulator soniachnoi elektrostantsii [elektronnyi resurs]. [in Ukrainian]. URL: <https://rent techno.ua/ua/solar-calc.html>.
8. Effektivnost ispolzovaniya solnechnykh trekerov (sistem orientatsii solnechnykh batarei). [in Russian]. URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner79/11275/>.