

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.94

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1.4>

Т.Е. АНДРУШКО

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9265-6757

Є.А. ДРОЗДОВА

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0276-6387

В.М. КОЗЕЛ

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2627-2499

О.В. ІВАНЧУК

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2058-4707**ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ФОТОЕЛЕМЕНТАМИ В УМОВАХ АДАПТИВНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ**

У роботі розглянута одна з проблем сонячних електростанцій, а саме зменшення обсягу вироблення енергії через зміну кута падіння сонячних променів. Чим більший кут, тем менше вироблення енергії. Для збільшення кількості енергії, що виробляється, використовуються системи трекінгу сонячних станцій. Завдяки механізмам позиціювання фотоелементів відносно положення сонця на небосхилі можлива підтримка фіксованого кута падіння сонячних променів на панель. Таке позиціювання дозволяє підтримувати максимальне вироблення електроенергії протягом світлового дня.

Для порівняння методів позиціювання було проведено дослідження вироблення енергії за допомогою моделювання роботи панелей у різних умовах. Було сформовано три основні моделі: сонячні панелі без адаптивного позиціювання, панелі з одноосьовим позиціюванням та сонячні панелі з двохосьовим позиціюванням. Для оцінки ефективності кожного методу були обрані критерії, за якими проводилось порівняння: кількість енергії, що виробляється, та витрати енергії на систему адаптивного позиціювання.

В отриманих моделях були враховані витрати на підтримання систем адаптивного позиціювання. Виявлено, що при використанні панелей з одноосьовим позиціюванням збільшується вироблення енергії на 22.1% протягом року. Якщо задіяти двохосьову систему адаптивного позиціювання, то збільшення вироблення енергії складе 24.2% відносно одноосьової системи позиціювання.

Дані з моделей були порівняні для кожного місяця року. В літні місяці показники вироблення енергії сонячними панелями з двохосьовим позиціюванням зменшуються відносно інших видів позиціювання сонячних панелей. Причиною є збільшення температури від прямих сонячних променів, що зменшує ефективність роботи. Але в інші місяці року система з двохосьовим позиціюванням має кращі показники, що нівелює показники влітку. Це особливо важливо взимку, коли велика кількість енергії витрачається на опалення.

Ключові слова: моделювання, сонячні панелі, вироблення енергії, адаптивне позиціювання, трекер.

Т.Е. АНДРУШКО

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9265-6757

Є.А. ДРОЗДОВА

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0276-6387

В.М. КОЗЕЛ

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2627-2499

А.В. ІВАНЧУК

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2058-4707**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ ФОТОЭЛЕМЕНТАМИ В ЯЗЫКАХ АДАПТИВНОГО ПОЗИЦИРОВАНИЯ**

В работе рассмотрена одна из проблем солнечных электростанций, а именно уменьшение объема выработки энергии из-за изменения угла падения солнечных лучей. Чем больше угол, тем меньше выработка энергии. Для увеличения количества производимой энергии используются системы трекинга солнечных станций. Благодаря механизмам позиционирования фотоэлементов относительно положения солнца на небосводе возможна поддержка фиксированного угла падения солнечных лучей на панель. Такое позиционирование позволяет поддерживать максимальную выработку электроэнергии в течение светового дня.

Для сравнения методов позиционирования было проведено исследование выработки энергии с помощью моделирования работы панелей в разных условиях. Были сформированы три основные модели: солнечные панели без адаптивного позиционирования, панели с одноосевым позиционированием и солнечные панели с двухосевым позиционированием. Для оценки эффективности каждого метода были выбраны критерии, по которым проводилось сравнение: количество вырабатываемой энергии и расход энергии на систему адаптивного позиционирования.

В полученных моделях были учтены расходы по поддержанию систем адаптивного позиционирования. Выявлено, что при использовании панелей с одноосевым позиционированием увеличивается выработка энергии на 22.1% в течение года. Если задействовать двухосевую систему адаптивного позиционирования, то увеличение выработки энергии составит 24.2% относительно одноосевой системы позиционирования.

Данные по моделям были сравнены по каждому месяцу года. В летние месяцы показатели выработки энергии солнечными панелями с двухосевым позиционированием уменьшаются по отношению к другим методам позиционирования солнечных панелей. Причиной является увеличение температуры от прямых солнечных лучей, что снижает эффективность работы. Но в другие месяцы года система с двухосевым позиционированием имеет лучшие показатели, что нивелирует показатели летом. Это особенно важно зимой, когда большое количество энергии тратится на отопление.

Ключевые слова: моделирование, солнечные панели, выработка энергии, адаптивное позиционирование, трекер.

T.E. ANDRUSHKO

Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-9265-6757

E.A. DROZDOVA

Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0276-6387

V.M. KOZEL

Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2627-2499

O.V. IVANCHUK

Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2058-4707

RESEARCH OF MODELS OF EFFICIENCY OF ENERGY PRODUCTION BY SOLAR PHOTOELEMENTS IN THE LANGUAGES OF ADAPTIVE POSITIONING

The paper considers one of the problems of solar power plants, namely, a decrease in the volume of energy generation due to a change in the angle of incidence of the sun's rays. The larger the angle, the less power generation. To increase the amount of energy produced, tracking systems of solar stations are used. Due to the positioning mechanisms of photocells relative to the position of the sun in the sky, it is possible to maintain a fixed angle of incidence of sunlight on the panel. This positioning allows you to maintain maximum power generation during daylight hours.

To compare positioning methods, a study was made of power generation by simulating panel operation under different conditions. Three main models have been formed: solar panels without adaptive positioning, solar panels with uniaxial positioning, and solar panels with biaxial positioning. To evaluate the effectiveness of each method, criteria were selected for comparison: the amount of energy generated and the energy consumption of the adaptive positioning system.

The resulting models took into account the costs of maintaining adaptive positioning systems. As a result, when using panels with single axis positioning, energy production increases by 22.1% during the year. If a two-axis adaptive positioning system is used, then the increase in energy production will be 24.2% compared to a single-axis positioning system.

The model data were compared for each month of the year. During the summer months, the energy yield of solar panels with dual axis positioning is reduced relative to other solar panel positioning methods. The reason is the increase in temperature from direct sunlight, which reduces the efficiency of work. But in other

months of the year, the biaxial positioning system performs better, which offsets the performance in the summer. Especially in winter, when a lot of energy is spent on heating.

Keywords: simulation, solar panels, power generation, adaptive positioning, tracker

Постановка проблеми

Ріст зацікавленості «зеленою» енергетикою у світі стимулює до встановлення сонячних електростанцій (СЕС), оскільки такі станції не мають шкідливих викидів та дозволяють економити на електроенергії.

Починаючи з 2017 року відбувається значне збільшення вироблення електроенергії за рахунок сонячних панелей. У 2017 році вироблення складало 1200 МВт. Вже у 2020 році цей показник склав 7331 МВт, що є ростом на 510% за 4 роки [1].

Однією з проблем сонячних електростанцій є зменшення обсягу вироблення енергії через зміну кута падіння сонячних променів. Чим більший кут, тем менше вироблення енергії [2].

Для збільшення кількості енергії, що виробляється, використовуються системи трекінгу сонячних станцій. Завдяки механізмам позиціонування фотоелементів відносно положення сонця на небосхилі можлива підтримка фіксованого кута падіння сонячних променів на панель. Таке позиціонування дозволяє підтримувати максимальне вироблення електроенергії протягом світлового дня.

Оскільки для підтримки позиціонування фотоелементів відносно сонця також потрібне енергоживлення систем керування, то виникає проблема, що витрати на живлення систем керування нівелюватимуть збільшене вироблення електроенергії сонячними панелями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [3] розглядається підвищення ефективності при використанні систем трекінгу положення сонця. Результати відображають загальне підвищення ефективності у світі, але відсутні дані щодо показників на території України.

У роботі [4] приведено дослідження щодо розрахунків щогодинного та щоденного сонячного випромінювання, що потрапляє на площину сонячної панелі, яка має систему стеження за позиціонуванням сонця. Отримані результати відображають підвищення на 66% випромінювання, яке отримує сонячна панель у місті Ер-Лянь-Хао.

У роботі [5] виконано порівняння виходу енергії для сонячних панелей зафіксованої панелі, з трекером для зміни за вертикальною віссю, з трекером для нахилу панелі та двохосовим трекером. Отримані результати показали збільшення вироблення енергії.

Формулювання мети досліджень

Основною метою дослідження є перевірка ефективності використання систем позиціонування фотоелементів задля підвищення енергоефективності сонячних електростанцій.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні питання:

- Сформулювати основні моделі систем сонячних електростанцій.
- Визначити критерії для аналізу плюсів та мінусів активних систем позиціонування.
- Обрати оптимальну модель системи позиціонування в залежності від їх ефективності за обраними критеріями.

Викладення основного матеріалу дослідження

Фотоелектричні модулі на даху або на відкритих територіях перетворюють сонячне світло на електричну енергію за допомогою напівпровідників — переважно кремнію. Сонячні колектори виробляють тепло для опалення та виробництва гарячої води, а також для кондиціонування повітря. Сонячні панелі можуть виробляти енергію і в похмуру погоду, і навіть у снігопад. Для найбільшої ефективності їх варто встановлювати під певним кутом - що далі від екватора, то більший кут установки панелей.

Сонячний трекер або активний трекер - пристрій, призначений для відстеження положення сонця та орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від сонячних батарей (або інших пристроїв, встановлених на трекері) [6]. Активний трекер працює наступним чином: за декількома датчиками контролер визначає оптимальне положення для сонячної батареї і змушує серводвигун повертати платформу з пристроєм у необхідний бік.

На рисунку 1 відображена зміна активного позиціонування сонячної панелі за зміною положення сонця.

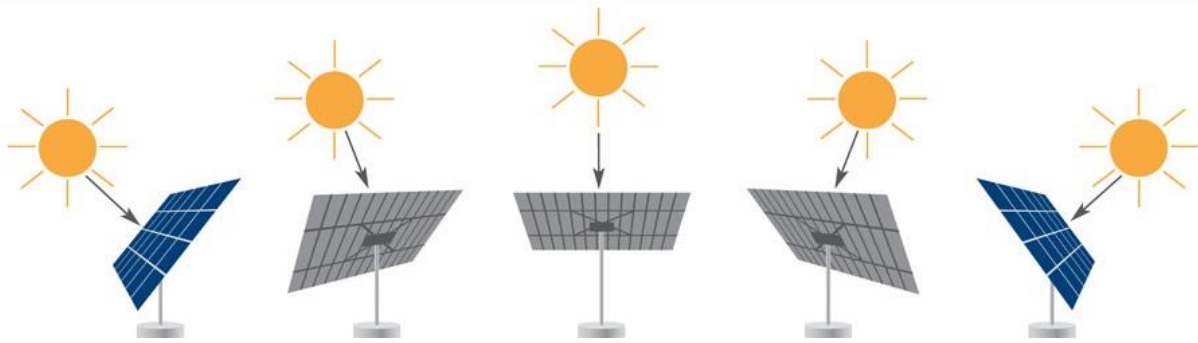


Рис. 1. Активне позиціонування сонячної панелі

Для дослідження було виділено 3 основні моделі сонячних станцій. Модель А – це статична система сонячних станцій. Для цієї групи основною метою буде визначити загальну кількість енергії, що виробляється на місяць та рік. Модель В – це сонячні станції з одноосовою системою стеження. Основна мета дослідження для цієї групи – порівняти кількість енергії, що виробляється, з енергією, яка використовується трекером для обертання систем за однією віссю. Модель С – це сонячні станції з двохосовою системою стеження, для неї кількість енергії, що виробляється, буде також порівняна з енергією, яка використовується трекером для обертання систем за двома осями.

Поточні дані введено до програми емуляції SAM в її підпрограму PVGIS. SAM – це безкоштовна техніко-економічна програмна модель, яка полегшує прийняття рішень для фахівців у галузі відновлюваних джерел енергії.

Модель А має наступні характеристики для розрахунку:

- SUNPORT POWER Потужність: 455Вт
- Рівень інсоляції в Херсонській області: 3,55
- Площа сонячних панелей: 10 кв.м
- Кут схилу покрівлі: 45°
- Відхилення від південного напрямку: 55°
- Загальні втрати: 14%.
- Сонячних годин: 873.17 год.

Результати моделювання для групи А показані на рисунку 2.

[Summary](#) [Data tables](#) [Graphs](#) [Cash flow](#) [Time series](#) [Profiles](#) [Statistics](#) [Heat map](#)

Metric	Value
Annual energy (year 1)	573,450 kWh
Gross-to-net conversion	89.1 %
Capacity factor (year 1)	63.2%
PPA price (year 1)	10.16 €/kWh
PPA price escalation	1.00 %/year
Levelized PPA price (nominal)	12.13 €/kWh
Levelized PPA price (real)	9.63 €/kWh
Levelized COE (nominal)	11.25 €/kWh
Levelized COE (real)	8.94 €/kWh
Net present value	\$49,280,528
Internal rate of return (IRR)	11.00 %
Year IRR is achieved	20
IRR at end of project	12.75 %
Net capital cost	\$780,959,232
Equity	\$362,743,008
Size of debt	\$418,216,224

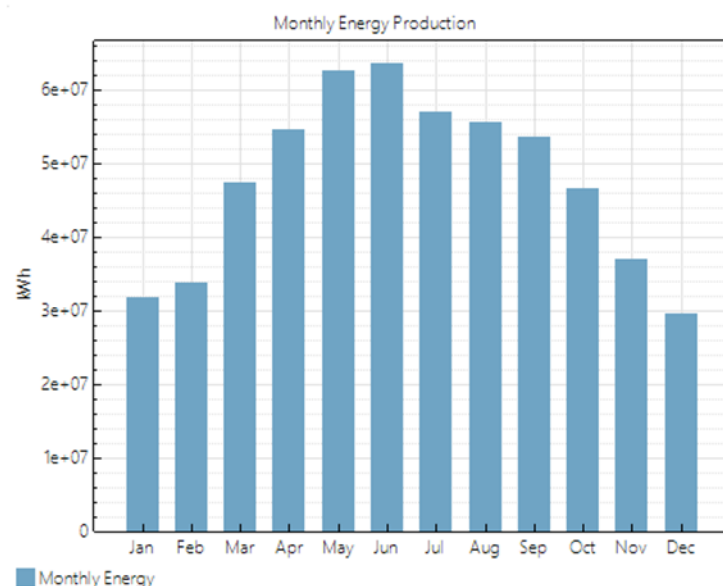


Рис. 2. Результати моделювання для моделі А

Результати моделювання демонструють, що отримана енергія не може повністю забезпечити незалежність від централізованого електропостачання. Протягом світлового дня кут нахилу сонця до сонячної панелі змінюється. Відповідно, змінюється і вироблення електроенергії сонячною панеллю.

Загальні річні втрати фіксованої системи в точці з координатами 53 ПШ і 45 СД, пов'язані з кутом нахилу сонця, складають 67,84%.

Враховуючи, що при використанні сонячного трекера втрат, що залежать від кута нахилу сонця, не може бути, оскільки сонце завжди буде спрямоване перпендикулярно до площини сонячної панелі, можна зробити висновок, що в порівнянні з фіксованою енергосистемою, при однаковій кількості сонячних панелей енергосистеми з використанням сонячного трекера зможуть виробляти більше енергії, зважаючи на суму розрахованих втрат.

При аналізі моделі В виконано три основні етапи, які зображено на рисунку 3.

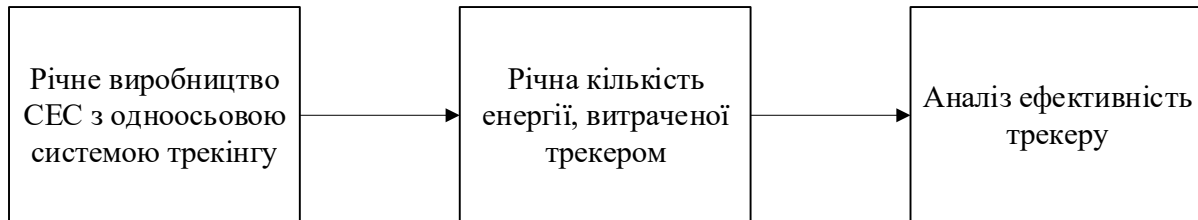


Рис. 3. Алгоритм розрахунків для моделі В

Етап 1. У Моделі В вводяться дані для розрахунку, ідентичні даним моделі А, за винятком кута нахилу панелей, оскільки відхилення від південного напрямку буде корегувати система активного трекінгу:

- SUNPORT POWER Потужність: 455Вт
- Рівень інсоляції в Херсонській області: 3,55
- Площа сонячних панелей: 10 кв.м
- Кут схилу покрівлі: 45°
- Відхилення від південного напрямку: корегується трекером
- Загальні втрати: 14%.
- Сонячних годин: 873.17 год.
- Живлення трекеру: 90 Вт/год.

Нові дані заносяться до таблиці, виконується моделювання, отримані результати зображені на рисунку 4.

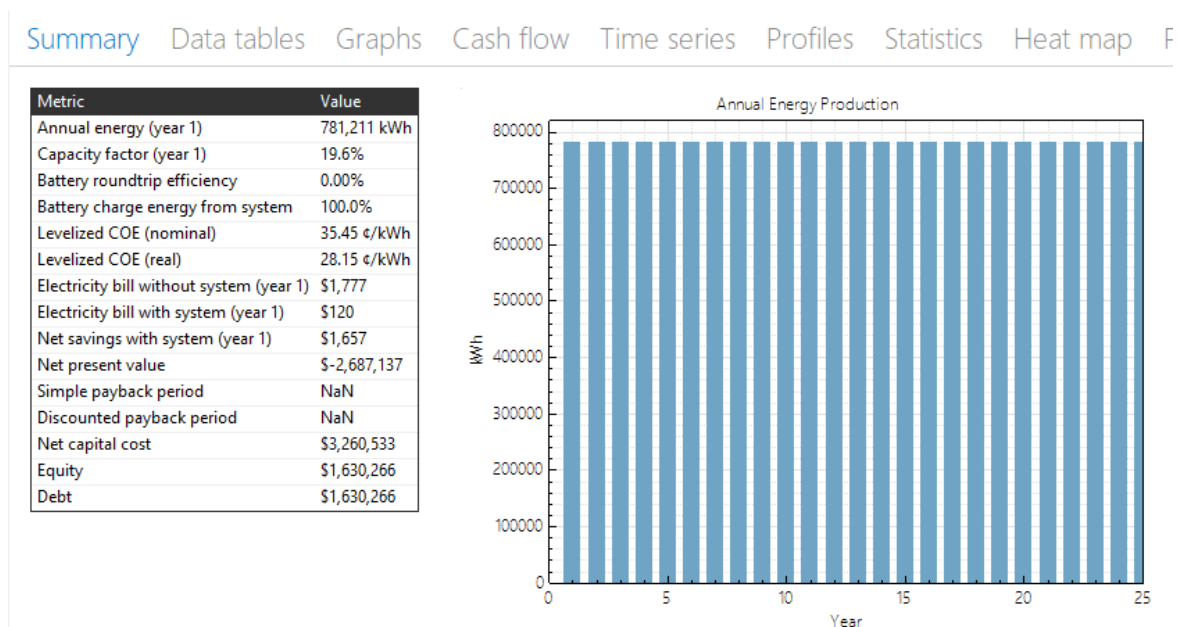


Рис. 4. Результати моделювання для моделі В

Порівнюючи кількість річного виробництва фотоелектричної енергії моделі А та моделі В, можна бачити зростання енергії на 207.761 кВт, що у відсотках складає 22.1%

Другий етап обчислення враховує при розрахунках витрачання фотоелектричної енергії активним трекером. Адже, активна система стеження буде використовувати енергію, яку постачають СЕС – це зроблено для того, щоб система стеження була незалежною від зовнішніх факторів та могла працювати незалежно від централізованого електропостачання. Отже до блоку вироблення енергії

додається блок одноосового трекінгу, енерговитрати за рік якого становлять 78,4кВт. Враховуючи похибку та витрати на модуль стеження, отримаємо значення загальних енерговитрат 81,1кВт за рік. У таблиці 1 зазначені розрахунки виробленої за рік енергії з урахуванням витрат на роботу трекера.

Таблиця 1

Розрахунки для другого етапу моделі В

Кількість фотоелектричної енергії, яку виробляє СЕС (значення за рік)	Кількість енергії, затраченої одноосовим трекером (значення за рік)	Підсумкове значення виробленої енергії за рік
781.211 кВт	81.1 кВт	700.111 кВт

Модель С – система сонячних станцій із двохосовим трекером стеження. Для визначення ефективності третьої моделі двохосового управління сонячних станцій використовуємо алгоритм моделі В. Єдиний фактор, який відрізняється від моделі В - це етап визначення енергії, витраченої трекером за рік. Адже на відміну від одноосового приладу двохвісний трекер використовує більш складну структуру стеження, у яку входить два крокових двигуни. Використання двох двигунів замість одного означає збільшення кількості енергії, витраченої на рух станцій. Але так як залежність виробітку фотоелектричної енергії лінійно залежить від куту нахилу панелей, то кількість виробленої енергії також збільшиться. У моделі С частина вихідних даних для розрахунку (потужність, рівень інсоляції та площа панелей) є ідентичними двом попереднім моделям. Кут схилю покрівлі та кут відхилення від південного напрямку будуть корегуватися системою активного двохосового трекінгу. Нові дані моделі:

- SUNPORT POWER Потужність: 455Вт
- Рівень інсоляції в Херсонській області: 3,55
- Площа сонячних панелей: 10 кв.м
- Кут схилю покрівлі: корегується трекером
- Відхилення від південного напрямку: корегується трекером
- Загальні втрати: 14%.
- Сонячних годин: 873.17 год.
- Живлення трекера: 180 Вт/год.

Отримані значення зображені на рисунку 5.

Metric	Value
Annual energy (year 1)	1,030,171 kWh
Capacity factor (year 1)	19.6%
Battery roundtrip efficiency	0.00%
Battery charge energy from system	100.0%
Levelized COE (nominal)	35.43 €/kWh
Levelized COE (real)	28.13 €/kWh
Electricity bill without system (year 1)	\$1,777
Electricity bill with system (year 1)	\$120
Net savings with system (year 1)	\$1,657
Net present value	\$-3,548,027
Simple payback period	NaN
Discounted payback period	NaN
Net capital cost	\$4,297,355
Equity	\$2,148,678
Debt	\$2,148,678

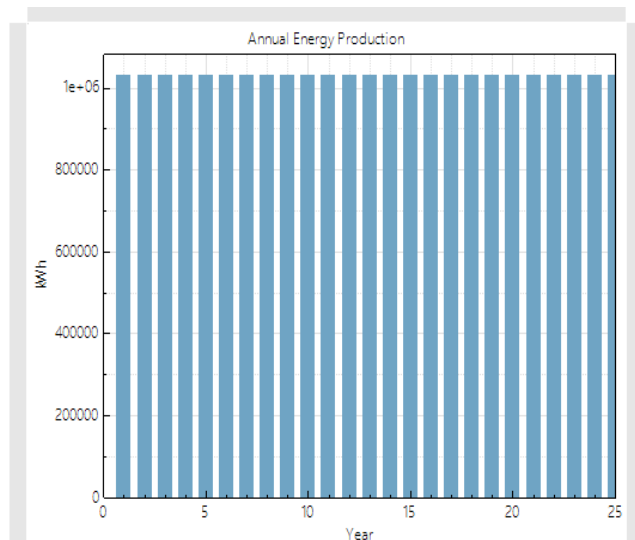


Рис. 5. Результати моделювання для моделі С

Порівнюючи кількість річного виробництва фотоелектричної енергії моделі В та моделі С, можна бачити зростання енергії на 249 506 кВт, що складає 24.2% від загального значення. У таблицю 2 занесені розрахунки енергії, виробленої за рік, з урахуванням витрат трекера для моделі С.

Таблиця 2

Розрахунки для другого етапу моделі С

Кількість фотоелектричної енергії яку виробляє СЕС (значення за рік)	Кількість затраченої енергії двохосовим трекером (значення за рік)	Підсумкове значення виробленої енергії за рік
1 030.171 кВт	181.1 кВт	849.07 кВт

Для порівняння трьох моделей А, В, С утворено таблицю 3.

Таблиця 3

Порівняння моделей А, В і С

Характеристики	Модель А	Модель В	Модель С
Мінімальна кількість видобутку енергії в рік	573.450 кВт	781.211 кВт	1 030.170 кВт
Мінімальна кількість енергії, витраченої трекером	-	81.1 кВт	181.1 кВт
Кінцеве значення отриманої енергії	573.450 кВт	700.111 кВт	849.07 кВт

Опираючись на дані із таблиці 3 та моделювання систем стеження та дослідження їх показників, побудовано систему із графіків виробленої фотоелектричної енергії по місяцях року, які зображені на рисунку 6. Для кожного з місяців зображено три криві – графіки для моделі А, В та С.

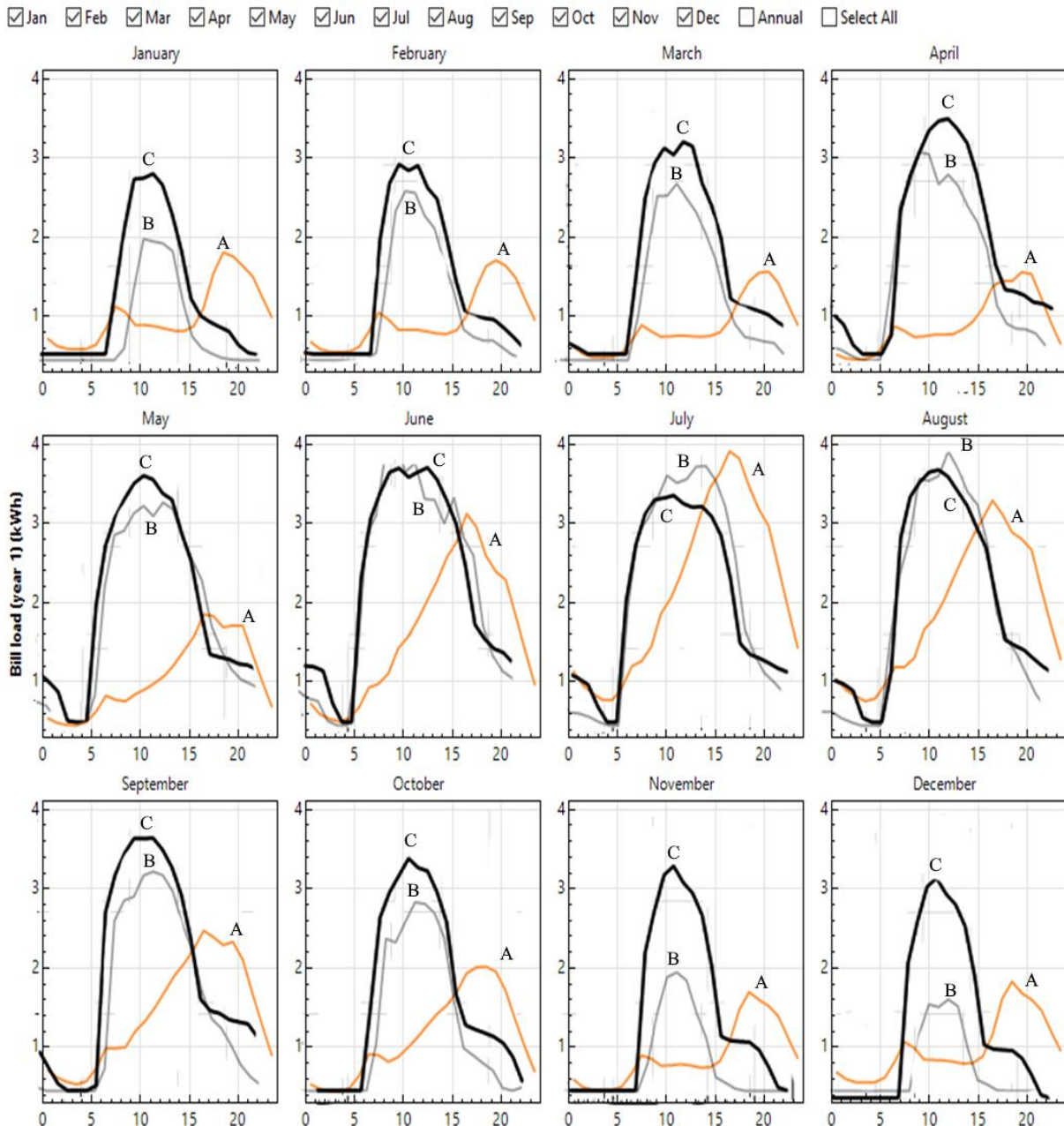


Рис. 6. Результати моделювання для моделей А, В та С

Аналізуючи проміжок часу від січня до квітня, отримаємо, що крива моделі С перевищує дві інші моделі на 0.6 кВт/год. На проміжку часу від травня до серпня бачимо спад ефективності моделі С та

зріст моделі А та В – це зумовлено прямими сонячними променями через що стають критичними показники температури, при яких ефективність станцій спадає, що й вплинуло на поточні показники. Але цей проміжок часу не настільки залежний від електроенергії, як проміжок від вересня по грудень, оскільки з настанням холодної пори року зростають витрати енергії для забезпечення стабільної температури у приміщенні. В цей сезон ефективність моделі С знову перевищує ефективність моделей А та В.

Висновки

Проведені дослідження показали, що двохосові системи стеження є найбільш ефективними серед розглянутих варіантів сонячних станцій. Отримані результати дозволяють оцінити моделі за такими критеріями:

- Ефективність генерації фотоелектричної енергії;
- Енерговитрати активної системи стеження.

Трекери значно розширюють діапазон часу, коли виробляється максимальна потужність. Використання активної системи стеження збільшує постачання фотоелектричної енергії до 40 відсотків.

Основна перевага електричних мереж споживачем спостерігається на початку та наприкінці доби, що ускладнює ефективне використання сонячних фотоелементів електростанцій без накопичувачів енергії. Із активною системою стеження ця проблема перестає бути актуальною, адже найефективніший проміжок часу виробітку енергії припадає на перші та останні 4 світлові години.

На підставі проведених оцінок та вимірювань отримані результати, які дозволяють зробити висновок, що застосування опорно-поворотних пристроїв, які здійснюють орієнтацію фотоелементів, істотно підвищує вироблення електроенергії і дає СЕС з трекером переваги по ефективності в порівнянні з нерухомими СЕС.

Список використаної літератури

1. Renewable capacity statistics 2021. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. 2021. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. (дата звернення: 02.02.22).
2. Difference Solar Radiation and Solar Insolation explained. URL: <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/solar-radiation-solar-insolation/> (дата звернення: 02.02.22).
3. Global Techno-Economic Performance of Bifacial and Tracking Photovoltaic Systems. Carlos D. and another. Joule, 2020. №4. С. 1337-1612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.005>
4. Calculation of the hourly and daily radiation incident on three step tracking planes. Bin Ai and other. Elsevier, 2003. №44. С. 1999-2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00229-7)
5. N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. El Shafee, E. T. El Shenawy. Computation of the Solar Energy Captured by Different Solar Tracking Systems. Energy Sources, 2000. №22. С. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.1080/00908310050014199>
6. Сергей Маринец. Трекер для фотоэлектрических установок. 2016. URL: <https://solarsoul.net/treker-dlya-fotoelektricheskix-ustanovok> (дата звернення: 02.02.22).
7. Joseph O'Connor. Off Grid solar: a handbook for photovoltaics with lead-acid or lithium-Ion batteries. Kindle edition. South Carolina : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2019. 198 с..
8. Susan Neill. Solar farms: the earthscan expert guide to design and construction of utility-scale photovoltaic systems. London : Routledge. 2017. 250 с.
9. Arnold Ringstad. The science of solar energy (Science of renewable energy). San Diego : Referencepoint Press, 2018. 80 с.
10. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / за ред.: В. Денцова. Ростов н/Д : Феникс, 2015. 382 с.
11. Bill Brooks. PV and the NEC, 1st edition, kindle edition. London : Routledge. 2018. 218p.
12. Bethel Afework, Ethan Boechler, Jordan Hanania, Anna Pletnyova, Kailyn Stenhouse, Brodie Yyelland, Jason Donev. Energy education. 2021. URL: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Insolation> (дата звернення: 02.02.22).
13. Insolation. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/insolation> (дата звернення: 02.02.22).
14. Динамічні системи SOLAR. URL: <https://ussolar.systems/ru/dinamichni-sistemi> (дата звернення: 02.02.22).
15. Н.Ткаченко, В.Кулінченко Економіка підприємства енергетичного комплексу : підручник. Київ : Алєрта, 2016. 336 с.
16. ABC аналіз. Що це таке? URL: <http://erp-project.com.ua/index.php/uk/korisni-materiali/statti/analitika/198-avs-analiz-hto-eto-takoe> (дата звернення: 02.02.22).

References

1. Renewable capacity statistics 2021. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021 Available at: www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021 (accessed 2 February 2021).
2. Difference Solar Radiation and Solar Insolation explained. Available at: sinovoltaics.com/learning-center/basics/solar-radiation-solar-insolation/ (accessed 2 February 2021).
3. Carlos D. Rodríguez-Gallegos, Haohui Liu, Oktoviano Gandhi, Jai Prakash Singh, Vijay Krishnamurthy, Abhishek Kumar, Joshua S. Stein, Shitao Wang, Li Li, Thomas Reindl, Ian Marius Peters. Global Techno-Economic Performance of Bifacial and Tracking Photovoltaic Systems. *Joule*, 2020, no. 4, pp. 1337-1612. doi: 10.1016/j.joule.2020.05.005.
4. Bin Ai, Hui Shen, Qun Ban, Binghou Ji, Xianbo Liao. Calculation of the hourly and daily radiation incident on three step tracking planes. *Elsevier*, 2003, no. 44, pp. 1999-2011. doi: 10.1016/S0196-8904(02)00229-7.
5. N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. El Shafee, E. T. El Shenawy. Computation of the Solar Energy Captured by Different Solar Tracking Systems. *Energy Sources*, 2000, no. 22, pp. 35-44. doi: 10.1080/00908310050014199.
6. Marynets S. Treker dlya fotoelektricheskikh ustanovok. [Tracker for photovoltaic installations]. Available at: solarsoul.net/treker-dlya-fotoelektricheskix-ustanovok (accessed 2 February 2021).
7. Joseph O'Connor. Off Grid solar: a handbook for photovoltaics with lead-acid or lithium-ion batteries. Kindle edition. South Carolina, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2019. 198 p.
8. Susan Neill. Solar farms: the earthscan expert guide to design and construction of utility-scale photovoltaic systems. London, Routledge, 2017. 250 p.
9. Arnold Ringstad. The science of solar energy (Science of renewable energy). San Diego, Referencepoint Press, 2018. 80 p.
10. Netraditsionnyie i vozobnovlyaemyie istochniki energii [Non-traditional and renewable energy sources]. Ed. Densova V. Rostov n/D, Feniks, 2015. 382 p.
11. Bill Brooks. PV and the NEC, 1st edition, kindle edition. London, Routledge, 2018. 218 p.
12. Bethel Afework, Ethan Boechler, Jordan Hanania, Anna Pletnyova, Kailyn Stenhouse, Brodie Yyelland, Jason Donev. Energy education. 2021. Available at: energyeducation.ca/encyclopedia/Insolation (accessed 2 February 2021).
13. Insolation. 2016. Available at: www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/insolation (accessed 2 February 2021).
14. Dynamichni systemy SOLAR [SOLAR dynamic systems]. Available at: ussolar.systems/ru/dinamichni-sistemi (accessed 2 February 2021).
15. Tkachenko N., Kulinchenko V. Ekonomika pidpriemstva enerhetychnoho kompleksu [Economics of the energy complex]. Kyiv, Alerta. 2016. 336 p.
16. ABC analiz. Shcho tse take? [ABC analysis. What it is?]. Available at: erp-project.com.ua/index.php/uk/korisni-materiali/statti/analitika/198-avs-analiz-chto-eto-takoe (accessed 2 February 2021).