

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ
ТРЕКЕРІВ В УРБАНІЗОВАНИХ УМОВАХ**

О. А. Петрик, кандидат технічних наук, доцент

І. А. Назаренко, кандидат технічних наук, доцент

Є. В. Васильєва, старший викладач

А. А. Кузьменко, старший викладач

Р. В. Жуков, аспірант

Національний університет «Запорізька політехніка»

E-mail: iternel17@ukr.net

Анотація. В умовах зростання цін на енергоносії та потреби в енергетичній незалежності, розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, набуває особливої актуальності. Сонячні електростанції (СЕС) на дахах багатоповерхових будівель є перспективним рішенням для міського середовища, де площа для наземних установок обмежена. Для максимізації виробітку електроенергії з обмеженої площі критично важливим є використання технологій, що підвищують ефективність системи. Сонячні трекери, які автоматично орієнтують фотомодулі перпендикулярно до сонячних променів, є одним із найефективніших інструментів для досягнення цієї мети.

Основною метою цього дослідження є аналіз технічної та економічної доцільності впровадження різних типів сонячних трекерів для СЕС, що розміщується на даху типового дев'ятиповерхового будинку.

Завданнями є:

- проведення порівняльного аналізу одновісних (HSAT, VSAT, з похилою віссю) та двохосних трекерів;
- виконання технічних розрахунків генерації та оцінка впливу ключових факторів, таких як просторові обмеження, затінення та температура;
- оцінка економічної доцільності, враховуючи початкові інвестиції та окупність;
- надання обґрунтованих рекомендацій для двох конкретних локацій в Україні: Запоріжжя (південь) та Івано-Франківськ (захід).

Ключові слова: фотомодуль, сонячний трекер, одновісні трекери, температура, інсоляція, багатоповерховий будинок

Актуальність. В умовах зростання цін на енергоносії та потреби в енергетичній незалежності, розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, набуває особливої актуальності. Сонячні електростанції (СЕС) на дахах багатоповерхових будівель є перспективним рішенням для міського середовища, де

площа для наземних установок обмежена. Для максимізації виробітку електроенергії з обмеженої площі критично важливим є використання технологій, що підвищують ефективність системи. Сонячні трекери, які автоматично орієнтують фотомодулі перпендикулярно до сонячних променів, є одним із найефективніших інструментів для досягнення цієї мети.

Питання підвищення ефективності сонячних електростанцій за допомогою трекерів є актуальним напрямком досліджень як в Україні, так і за кордоном. Сучасні наукові праці зосереджуються на оптимізації конструкцій трекерів, їх адаптації до обмеженого простору в урбанізованих умовах та врахуванні кліматичних факторів, таких як температура та інсоляція.

Дослідження і аналіз технічної та економічної доцільності впровадження різних типів сонячних трекерів для СЕС, що розміщується на даху типового дев'ятиповерхового будинку, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виконано розширений аналіз літератури, що стосується використання сонячних трекерів, їхньої продуктивності, впливу температури та особливостей застосування на дахах багатоповерхових будинків.

Дослідження сучасних систем сонячного стеження, представлене в огляді [1], детально аналізує одновісні (HSAT, VSAT) та двовісні (азимутальні, з похилою віссю) трекери. Автори встановили, що приріст ефективності таких систем може коливатися від 15 % до 67,65 % залежно від типу трекера та географічного розташування. Особливу увагу приділено розробці алгоритму для вибору оптимальної системи стеження, який враховує просторові обмеження та кліматичні умови. Зазначається, що горизонтальні одновісні трекери (HSAT) є економічно вигідним рішенням для регіонів із середньою інсоляцією, таких як Україна, тоді як двовісні трекери демонструють вищу ефективність у регіонах із високою сонячною активністю, хоча й потребують значно більшої площі для розміщення. Цей аспект є критичним для урбанізованих зон, де простір на дахах багатоповерхівок обмежений.

Порівняльний аналіз сонячних трекерів [2] підкреслює мультидисциплінарний підхід до їхнього розвитку. Дослідження вказує, що HSAT забезпечує приріст

продуктивності до 25–30 % у широтах, близьких до України, тоді як двовісні трекери можуть досягати приросту до 40 %. Важливим висновком є акцент на адаптації трекерів до обмеженого простору, зокрема на дахах багатоповерхових будинків. Вертикальні одновісні трекери (VSAT) вирізняються компактністю, що робить їх особливо придатними для урбанізованих умов, де щільне розміщення панелей є ключовим фактором. Цей висновок підтверджує необхідність балансу між підвищенням ефективності та збереженням максимальної кількості панелей на обмеженій площі.

Дослідження впливу трекерів на сонячну ефективність [3] доповнює попередні висновки, надаючи експериментальні дані про приріст енергії. Зокрема, одновісні трекери підвищують вихід енергії на 10–20 %, тоді як двовісні забезпечують приріст на 30–40 %. У контексті міських умов автори рекомендують використовувати VSAT та азимутальні трекери, оскільки вони ефективно мінімізують затінення при щільному розташуванні панелей.

Аналіз технологій сонячного стеження [4] заглиблюється в механізми роботи трекерів, порівнюючи активні та пасивні системи. Активні трекери, оснащені електроприводами, здатні забезпечити приріст до 56 %, але їхнє енергоспоживання є суттєвим недоліком. Натомість пасивні системи, що базуються на термогідравлічних механізмах, є економічнішими, хоча менш точними у відстеженні Сонця. У статті підкреслюється важливість адаптації трекерів до дахових установок, де просторові обмеження ускладнюють використання громіздких систем, таких як двовісні трекери. Цей аспект є ключовим для урбанізованих умов, де кожен квадратний метр даху має бути використаний максимально ефективно.

Використання штучного інтелекту для оптимізації трекерів, розглянуте в [5], підкреслює потенціал AI-систем у прогнозуванні траєкторії сонця та адаптації до затінення в урбанізованих умовах. Такі системи підвищують ефективність на 15–20 %, що є особливо цінним для зелених будівель у містах, де затінення від сусідніх споруд є суттєвим викликом.

Температурний вплив на ефективність сонячних панелей є ще одним ключовим аспектом, розглянутим у [6]. Дослідження показує, що втрати ефективності монокристалічних панелей становлять 0,3–0,5 % за кожен градус вище 25 °С, що є критичним для Запоріжжя з літніми температурами до +35 °С. Цей фактор необхідно враховувати при проєктуванні СЕС, особливо в південних регіонах України.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні сонячних трекерів, комбінований вплив просторових обмежень, кліматичних умов і температури на ефективність СЕС в урбанізованих умовах України залишається недостатньо вивченим. Це підкреслює актуальність цього аналізу, який спрямований на заповнення цієї прогалини через детальний розрахунок і порівняння різних типів трекерів у контексті типового дев'ятиповерхового будинку. На основі аналізу літературних джерел виконано цю роботу, а також оцінено їхню доцільність в умовах України на основі порівняння південних та західних регіонів. Дані інсоляції, наведені в [7], вказують на глобальне горизонтальне опромінення (GHI) ~1400 кВт·год/м²/рік для Запоріжжя та ~1150 кВт·год/м²/рік для Івано-Франківська, що підтверджує вищий енергетичний потенціал південних регіонів України. Глобальний атлас сонячної енергії [8] додатково підкреслює значний потенціал України для сонячної енергетики, особливо в контексті використання трекерів у регіонах із високою інсоляцією.

Мета дослідження – аналіз технічної та економічної доцільності впровадження різних типів сонячних трекерів для СЕС, що розміщується на даху типового дев'ятиповерхового будинку.

Матеріали та методи дослідження. Для розрахунків та аналізу було задано такі умови:

- географічні дані: варіант 1 (м. Запоріжжя): координати 47°51'15" пн. ш., 35°8'18" сх. д. Широта $\varphi \approx 47.85^\circ$; варіант 2 (м. Івано-Франківськ): координати 48°55'15" пн. ш., 24°42'31" сх. д. Широта $\varphi \approx 48.92^\circ$.

- технічні дані:

- розміри ділянки: довжина 60 м, ширина 20 м.

- висота будівлі: 31 м.
- розміри фотомодуля: 2.1 м × 1.13 м.
- номінальна потужність модуля: 560 Вт.
- додаткові обмеження: сервісні коридори 1 м, пожежні відступи 1.5 м.
- кліматичні дані (задані): варіант 1 - Запоріжжя: зима -18 °С, літо +35 °С; варіант 2 - Івано-Франківськ: зима -23 °С, літо +27 °С.

Згідно методології [9] виконано просторове моделювання, що враховує фізичні обмеження ділянки та критичний аналіз затінення від самої будівлі. Кліматологічний аналіз ґрунтується на даних про середньорічну інсоляцію за [14] для обох регіонів, а також вплив екстремальних температур на генерацію.

Розрахунки енергетичного виробітку здійснювалися на основі формул [9] за наведених вище умов.

У кінцевому етапі проведено оцінку технічних та експлуатаційних ризиків, а також економічне обґрунтування доцільності впровадження кожної з систем за [5,9].

Місто Запоріжжя розташоване в степовій зоні на півдні України, що зумовлює помірно-континентальний, посушливий клімат з великою кількістю сонячних днів [14, 15] Середньорічна інсоляція в регіоні становить близько 1800 годин [5]. Такі показники створюють високий потенціал для сонячної енергетики. Однак, для південних регіонів існує негативний вплив, пов'язаний з високими температурами. Влітку температура в Запоріжжі може досягати +35 °С, а абсолютний максимум [14] фіксувався на рівні 39-41 °С. При температурі +35 °С втрати потужності можуть становити близько 3,5 % [10] Таким чином, висока інсоляція в м. Запоріжжя влітку частково нівелюється зниженням ефективності панелей через перегрівання. Сезонна динаміка генерації в регіоні дуже виражена — різниця між піковим літнім та мінімальним зимовим виробітком може сягати 7-10 разів [5], що потребує використання трекерів, які можуть максимізувати генерацію в осінньо-зимовий період, коли кут сонця найнижчий, а температура навколишнього середовища є оптимальною для роботи фотомодулів [6].

Місто Івано-Франківськ розташоване у передгір'ї Карпат, що впливає на клімат, роблячи його більш вологим та нестабільним, з частими опадами, туманами та

хмарністю [11]. Середні літні температури становлять +20-25 °С, досягаючи максимумів до +27 °С [11]. Цей клімат підвищує ефективність використання сонячних панелей. Хоча через часту хмарність рівень інсоляції нижчий, ніж у м. Запоріжжя, однак менш високі літні температури призводять до менших втрат генерації. Втрати потужності від нагрівання панелей будуть мінімальними, що дозволить системі працювати ближче до номінального ККД протягом літніх місяців. Зимові температури можуть знижуватися до -23 °С, що також позитивно впливає на ефективність, оскільки за низьких температур ККД перетворення зростає [6]. Також, через вищу географічну широту, сонце взимку знаходиться значно нижче над горизонтом, що робить статичні установки менш ефективними [12]. Цей фактор робить впровадження двоосних трекерів, які можуть ефективно «ловити» сонце як по азимуту, так і по висоті, особливо доцільним для максимізації виробітку в Івано-Франківську [13].

У таблиці 1 наведено ключові географічні та кліматичні параметри, що впливають на розрахунок виробітку СЕС у двох досліджуваних локаціях.

1. Географічні та кліматичні параметри локацій

Параметр	Варіант 1 (м. Запоріжжя)	Варіант 2 (м. Івано-Франківськ)
Географічна широта	47.85 пн. ш.	48.92 пн. ш.
Клімат	Континентальний	Передгір'я, вологий
Середньорічна інсоляція	1800 год/рік	1500–1600 год/рік
Літня температура (задана)	+35 °С	+27 °С
Зимова температура (задана)	-18 °С	-23 °С
Вплив температури на генерацію	Значні втрати влітку	Мінімальні втрати влітку, приріст взимку

Виділена ділянка має розміри 60 м x 20 м, що становить 1200 м². Однак, ця площа не може бути використана повністю. Необхідно врахувати пожежні відступи (1.5 м по периметру) та сервісні коридори між рядами (1 м) [2]. Це значно зменшує ефективну площу для встановлення. Кількості модулів та потужність, що буде, за

умови статичної та трекерної системи, розміщатися на будинку зведемо в таблицю 2.

2. Порівняння кількості модулів та потужності

Тип системи	Відстань між рядами (м)	Кількість рядів	Кількість модулів	Встановлена потужність (кВт)
Статична	3.5	16	240	134.4
Трекерна	4.5	12	180	100.8

Результати досліджень та їх обговорення. Порівняємо річну генерацію для статичних, одновісних та двохосних систем для м. Запоріжжя та м. Івано-Франківська (рис. 1).

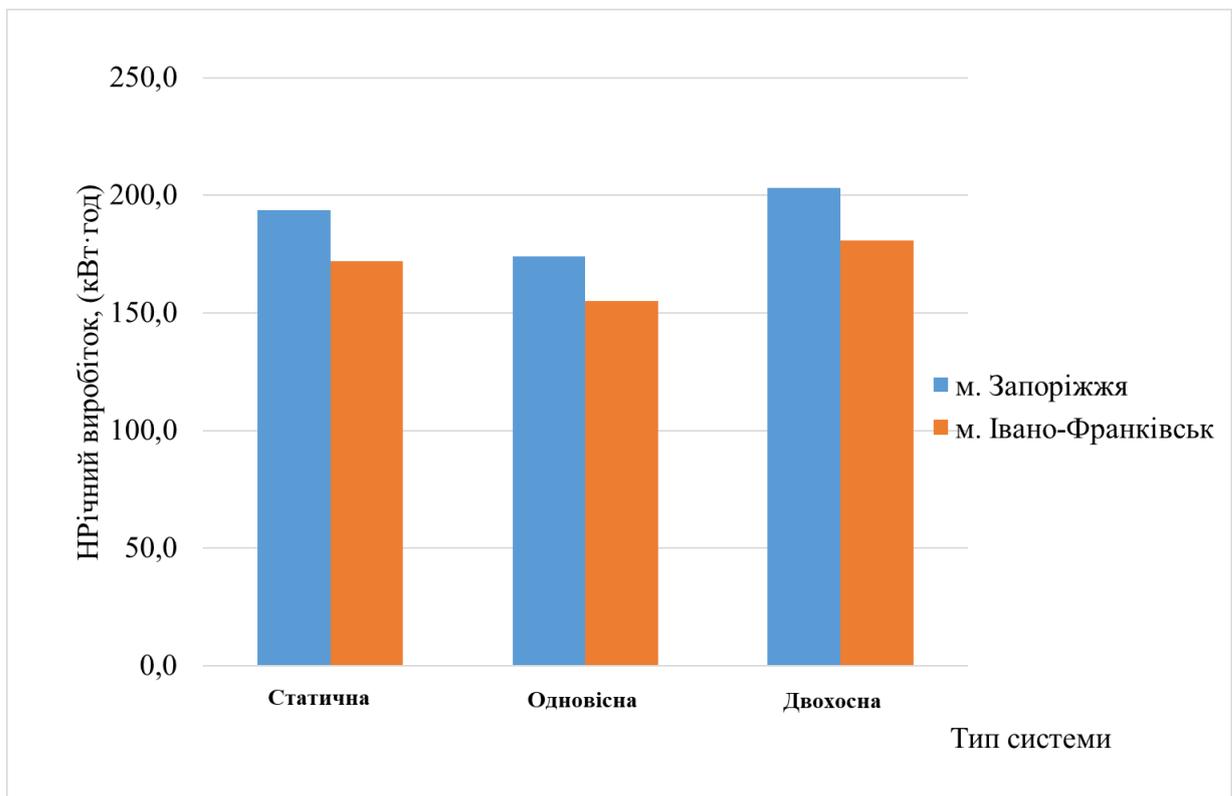


Рис. 1. Порівняння річної генерації для м. Запоріжжя та м. Івано-Франківська

Розміщення сонячних трекерів на даху будівлі висотою 31 м створює значні інженерні виклики. Більшість комерційних трекерів призначені для наземного монтажу [15], де вітрові навантаження менші та простіше забезпечити надійний фундамент. Зі збільшенням висоти вітрове навантаження зростає за

експоненціальною залежністю, що є критичним фактором для конструкцій з рухомими частинами [13].

Існує протиріччя в інформації про вітрову стійкість трекерів: деякі джерела зазначають про наявність систем захисту від сильного вітру [11, 16], тоді як інші попереджають, що рухома конструкція значно зменшує її стійкість та надійність при сильних поривах [12]. Це вказує на те, що стандартні рішення можуть бути недостатніми. Встановлення на висоті 31 м вимагає обов'язкового спеціалізованого структурного аналізу з урахуванням місцевих будівельних норм (ДБН), хоча ці норми не містять специфічних вимог для монтажу сонячних трекерів на дахах. Це може призвести до необхідності значного посилення конструкції даху, що збільшить вартість та складність проекту, потенційно роблячи його економічно недоцільним.

Враховуючи вартість систем, потужність та експлуатаційні витрати зробимо зведену порівняльну таблицю.

3. Зведена порівняльна таблиця

Параметр	Статична система	Одновісна система	Двовісна система
Кількість панелей	240	180	180
Загальна потужність (кВт)	134.4	100.8	100.8
Річний виробіток Запоріжжя (кВт·год)	193,536	174,182	203,212
Річний виробіток Івано-Франківськ (кВт·год)	172,032	155,200	180,953
Орієнтовна вартість системи	(Базова)	Вища на =20–30 % від базової	Вища на =40–60 % від базової
Технічні ризики	Низькі	Середні	Високі
Експлуатаційні витрати	Низькі	Середні	Високі

Висновки та перспективи. На основі проведених досліджень встановлено: - для Запоріжжя: Регіон має високий сонячний потенціал, але значні температурні втрати влітку знижують ефективність. Впровадження одновісних трекерів (HSAT) є найбільш обґрунтованим рішенням. Вони забезпечують значний приріст генерації

(до 25 %) при помірних додаткових інвестиціях, що може призвести до швидкої окупності проєкту, особливо для комерційних цілей.

- для Івано-Франківська: Рівень інсоляції нижчий за варіант 1, але кліматичні умови забезпечують кращий ККД панелей. Вища широта регіону робить трекінг особливо ефективним, оскільки він дозволяє максимізувати виробіток у пікові періоди дня та взимку, коли сонце знаходиться низько. Через це, двовісні або одновісні трекери з похилою віссю (TSAT) є найбільш технічно доцільними для цього регіону. Проте, їхня висока вартість та складність можуть збільшити термін окупності, що вимагає ретельного економічного обґрунтування.

Критичний фактор висотного розміщення: Найбільшим ризиком для обох локацій є розміщення трекерів на висоті 31 м. Це створює екстремальні вітрові навантаження, які не завжди враховуються у стандартних розрахунках і можуть знизити надійність та безпеку системи.

Список використаних джерел

1. Solar tracker – Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker.
2. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту.
3. Al-Najjar, H., & Al-Amri, F. (2018). The Effect of Solar Tracking Systems on the Efficiency of PV Power Generation in Oman. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 231.
4. Solar Trackers: Types and Benefits. Solar Energy Industries Association. URL: <https://www.seia.org/initiatives/solar-trackers>.
5. Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(9), 1618-1628.
6. PV-GIS. Photovoltaic Geographical Information System. European Commission. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
7. Запоріжжя: клімат. Український гідрометеорологічний центр. URL: <http://meteo.gov.ua/>
8. Climate of Ukraine. State Emergency Service of Ukraine. URL: <https://www.dsns.gov.ua/>
9. Solanki, C. S. (2015). *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*. PHI Learning Pvt. Ltd, 185.
10. Solar Panel Derating Factors. Clean Energy Reviews. URL: <https://www.cleanenergyreviews.info/solar-derating-factors>
11. Клімат Івано-Франківська. Український гідрометеорологічний центр. URL: <http://meteo.gov.ua/>

12. Tracking Systems vs. Fixed Mounts. Solar Power World. URL: <https://www.solarpowerworldonline.com/tracking-systems-vs-fixed-mounts/>
13. Single-Axis vs. Dual-Axis Solar Trackers. Solar Builder. URL: <https://solarbuildermag.com/single-axis-vs-dual-axis-solar-trackers/>
14. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). European Commission, 2024. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en
15. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. Wiley, 175.
16. Single-Axis vs. Dual-Axis Solar Trackers. Solar Builder. URL: <https://solarbuildermag.com/single-axis-vs-dual-axis-solar-trackers/>

References

1. Solar tracker – Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker.
2. DBN V.2.5-56:2014 Anti-burn protection systems.
3. Al-Najjar, H., & Al-Amri, F. (2018). The Effect of Solar Tracking Systems on the Efficiency of PV Power Generation in Oman. International Journal of Scientific & Engineering Research, 231.
4. Solar Trackers: Types and Benefits. Solar Energy Industries Association. Available at: <https://www.seia.org/initiatives/solar-trackers>.
5. Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, 83(9), 1618-1628.
6. PV-GIS. Photovoltaic Geographical Information System. European Commission. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
7. Zaporizhzhya: climate. Ukrainian Hydrometeorological Center. Available at: <http://meteo.gov.ua/>
8. Climate of Ukraine. State Emergency Service of Ukraine. Available at: <https://www.dsns.gov.ua/>
9. Solanki, C. S. (2015). Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications. PHI Learning Pvt. Ltd, 185.
10. Solar Panel Derating Factors. Clean Energy Reviews. Available at: <https://www.cleanenergyreviews.info/solar-derating-factors>
11. Climate of Ivano-Frankivsk. Ukrainian Hydrometeorological Center. Available at: <http://meteo.gov.ua/>
12. Tracking Systems vs. Fixed Mounts. Solar Power World. Available at: <https://www.solarpowerworldonline.com/tracking-systems-vs-fixed-mounts/>
13. Single-Axis vs. Dual-Axis Solar Trackers. Solar Builder. Available at: <https://solarbuildermag.com/single-axis-vs-dual-axis-solar-trackers/>
14. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). European Commission, 2024. Available at https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en
15. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. Wiley, 175.

16 Single-Axis vs. Dual-Axis Solar Trackers. Solar Builder. Available at: <https://solarbuildermag.com/single-axis-vs-dual-axis-solar-trackers/>

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF USING SOLAR TRACKER IN URBANIZED CONDITIONS

O. Petryk, I. Nazarenko, E. Vasilyeva, A. Kuzmenko, R. Zhukov

Abstract. *In the context of rising energy prices and the need for energy independence, the development of renewable energy sources, in particular solar, is becoming particularly relevant. Solar power plants (SPPs) on the roofs of multi-story buildings are a promising solution for urban environments, where the area for ground-based installations is limited. To maximize electricity production from a limited area, it is critical to use technologies that increase system efficiency. Solar trackers, which automatically orient photovoltaic modules perpendicular to the sun's rays, are one of the most effective tools for achieving this goal.*

The main objective of this study is to analyze the technical and economic feasibility of implementing different types of solar trackers for a solar power plant located on the roof of a typical nine-story building.

The objectives are:

- to conduct a comparative analysis of single-axis (HSAT, VSAT, tilted axis) and dual-axis trackers;*

performing technical generation calculations and assessing the impact of key factors such as spatial constraints, shading and temperature;

- assessing economic feasibility, taking into account initial investments and payback;*
- providing sound recommendations for two specific locations in Ukraine: Zaporizhia (south) and Ivano-Frankivsk (west).*

Key words: *photovoltaic module, solar tracker, single-axis trackers, temperature, insolation, multi-storey building*