

І.А. Валявський, канд. техн. наук, **О.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна
e-mail: valiavskyia@kntu.kr.ua

Підвищення ефективності сонячної енергогенерації за допомогою механізмів паралельної структури

Запропоновано використання механізму паралельної структури типу «гексапод» для зміни кута нахилу сонячної панелі з метою забезпечення перпендикулярності її поверхні до сонячних променів. Визначено аналітичні залежності між положенням виконавчого органу «гексапода» (сонячної панелі) і довжиною його кінематичних ланок, які використовуються в системі керування зазначеного механізму. Показано, що сонячний трекер на основі механізму паралельної структури може генерувати на 30% більше енергії у порівнянні з системами з постійним кутом встановлення панелей.

сонячна енергогенерація, сонячний трекер, гексапод, механізм паралельної структури, платформа Стюарта

Постановка проблеми. Одним з напрямків розвитку енергетики з використанням альтернативних джерел є сонячна енергетика. Підвищення продуктивності сонячних електростанцій (СЕС) є важливою науково-практичною проблемою. Сонячні панелі функціонують найефективніше у випадку, коли сонячні промені перпендикулярні їх поверхням. Чим гостріший кут між поверхнею панелі і напрямком сонячних променів, тим більші втрати ККД [1]. Тому розробка ефективного механізму керування кутом нахилу сонячних панелей є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для досягнення максимальної продуктивності сонячні панелі повинні бути змонтовані так, щоб сонячні промені падали на робочу поверхню під кутом 90° . Двохосьові трекерні системи це забезпечують, проте є дорогими, споживають енергію та вимагають великої площі. Тому у більшості фотоелектричних систем використовують стаціонарні конструкції як компроміс між продуктивністю та вартістю. Продуктивність енергії фотоелектричної системи залежно від монтажною конструкції наведена в табл. 1 [2]. Аналіз впливу кута нахилу на ефективність СЕС описаний у [3, 4]. Підхід до керування механізмами з паралельною кінематикою розглянуто у [5].

Таблиця 1 – Продуктивність енергії фотоелектричної системи залежно від типу монтажною конструкції

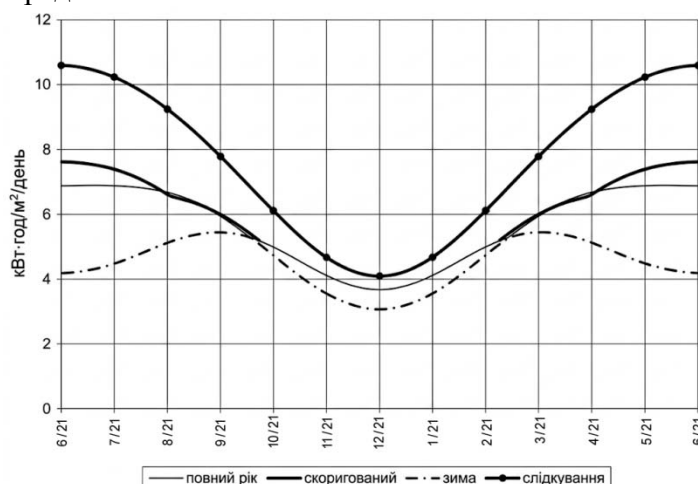
Тип монтажною конструкції	Відносна продуктивність, %
Фіксований кут	80–95
Регулювання кута 2 рази на рік	95–99
Регулювання кута 4 рази на рік	98–99
Двохосьовий трекер	100 (база)

Джерело: складено на підставі [2]

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності сонячних електростанцій шляхом зміни положення сонячної панелі залежно від положення сонця за допомогою механізмів паралельної структури. Для досягнення мети необхідно: 1) розглянути вплив кута нахилу сонячних панелей на енергогенерацію; 2) розробити механізм паралельної структури для керування положенням сонячних панелей; 3) вирішити зворотну задачу кінематики для запропонованого механізму.

Виклад основного матеріалу.

1) Оптимальне значення кута нахилу залежить від широти місцевості та сезону. При зміні кута два рази на рік на широті 25° – 50° кращим кутом для літа є: широта $\times 0,93 - 21^{\circ}$; для зими: широта $\times 0,875 + 19,2^{\circ}$. Взимку панелі при зимовому куті нахилу захоплюють від 81 до 88% енергії двохосової трекерної системи [2]. Графік впливу регулювань кута нахилу на продуктивність наведений на рис. 1. Таблиця кутів нахилу для різних сезонів представлена в табл. 2.



повний рік – кількість енергії при встановленні сонячної батареї з фіксованим оптимальним кутом нахилу; скоригований – кількість енергії при регулюванні кута нахилу чотири рази на рік; зима – кількість енергії, коли сонячні панелі встановлені на зимовий кут; слідування – кількість енергії, що можна отримати від двохосової трекерної системи стеження, яка орієнтує панелі перпендикулярно до сонячних променів

Рисунок 1 – Графік впливу регулювань кута нахилу сонячних панелей на їх продуктивність
Джерело: складено на підставі [2]

Таблиця 2 – Кути нахилу сонячних панелей для різних сезонів (широта 40°)

Сезон	Оптимальний кут, $^{\circ}$	% від трекерної системи
Зима	44°	81–88%
Весна / Осінь	34°	74–75%
Літо	16°	68–74%
Регулювання 4 рази/рік	змінний	98–99%

Джерело: складено на підставі [2]

2) З метою оптимізації кута падіння сонячних променів пропонується використовувати гексапод, який завдяки паралельній структурі дозволяє ефективно керувати положенням панелі (рис. 2) [6]. Механізм складається з рухомого виконавчого органу АВС, який шарнірно пов'язаний з нерухомим елементом механізму КНМ за

допомогою шести кінематичних ланок змінної довжини KA , MA , MC , NC , NB і KB . Регулюючи довжини кінематичних ланок, можна забезпечувати необхідний просторовий рух (орієнтацію) виконавчого органу, на якому закріплюється сонячна панель [5]. Механізм побудований на основі просторової ферми, що забезпечує його високу жорсткість і дозволяє встановлення панелей значного розміру та маси.

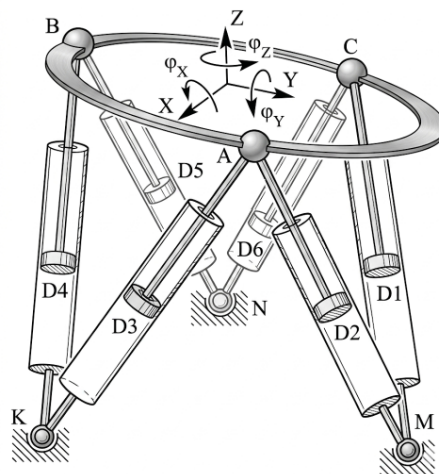


Рисунок 2 – Шестикординатний механізм паралельної структури («гексапод»)

Джерело: складено на підставі [5]

3) Для керування гексаподом необхідно вирішити зворотну задачу кінематики — визначити довжини кінематичних ланок, що відповідають заданому положенню виконавчого органу [9]. Розглянемо розрахункову схему механізму (рис. 3): $O_H X_H Y_H Z_H$ — нерухома система координат; A, B, C, D, E, F — центри опорних шарнірів несучої системи; $O_P X_P Y_P Z_P$ — рухома система координат, пов'язана з виконавчим органом; a, b, c, d, e, f — центри шарнірів виконавчого органу у рухомій системі координат.

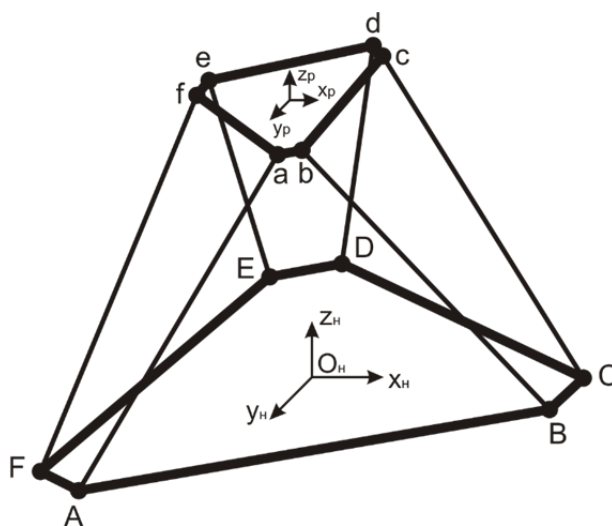


Рисунок 3 – Розрахункова схема механізму

Джерело: розроблено авторами

Положення рухомої системи координат $O_P X_P Y_P Z_P$ відносно нерухомої $O_H X_H Y_H Z_H$ задається трьома лінійними координатами (x, y, z) та трьома кутами Ейлера (φ, θ, ψ). Згідно з положеннями аналітичної геометрії координати точки у нерухомій системі визначаються за формулою (1):

$$\bar{r}_H = M\bar{r}_p + \bar{r}_p^H, \quad (1)$$

де $\bar{r}_H = (x_H \ y_H \ z_H)^T$ – радіус-вектор, що визначає положення деякої точки у нерухомій системі координат; $\bar{r}_p = (x_p \ y_p \ z_p)^T$ – радіус-вектор, що визначає положення цієї точки у рухомій системі координат; M – матриця послідовних поворотів на кути Ейлера ϕ, θ, ψ ; $\bar{r}_p^H = (x_p^H \ y_p^H \ z_p^H)^T$ – радіус-вектор, що визначає положення початку координат рухомої системи у нерухомій.

Розрахункова схема кінематичної ланки показана на рис. 4. Довжина кінематичної ланки визначається як відстань між точками несучої системи та виконавчого органу за формулою (2):

$$\bar{r}_{Aa} = M \cdot \bar{r}_{a(p)} + \bar{r}_{M(H)} - \bar{r}_{A(H)}, \quad (2)$$

де $\bar{r}_{M(H)}$ – радіус-вектор, що визначає задану точку M у нерухомій системі координат; $\bar{r}_{a(p)}$ – радіус-вектор, що визначає точку a у рухомій системі координат; $\bar{r}_{A(H)}$ – радіус-вектор, що визначає точку A несучої системи у нерухомій системі координат.

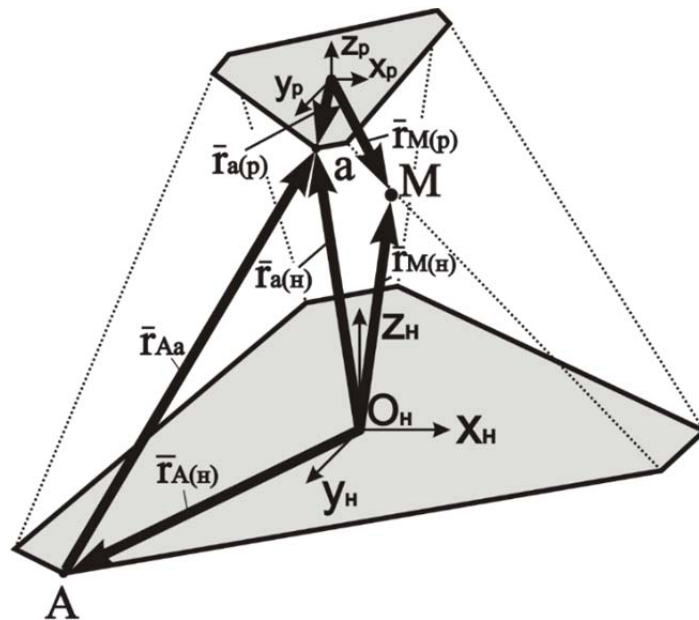


Рисунок 4 – Розрахункова схема кінематичної ланки

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, довжина ланки Aa буде дорівнювати (3):

$$l_{Aa} = \sqrt{x_{Aa}^2 + y_{Aa}^2 + z_{Aa}^2}, \quad (3)$$

де

$$x_{Aa} = x_{A(H)} - x_{M(H)} - \cos \phi_p^H \cdot \cos \psi_p^H \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos \phi_p^H \cdot \sin \psi_p^H \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) - \sin \phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Aa} = y_{A(H)} - y_{M(H)} - (\cos \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \phi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \phi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \\ + \sin \theta_p^H \cdot \cos \phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Aa} = z_{A(H)} - z_{M(H)} - (\sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \cos \theta_p^H \cdot \sin \phi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \phi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \\ + \cos \theta_p^H \cdot \cos \phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)}).$$

Аналогічно за формулою (3) визначаються довжини всіх шести кінематичних ланок Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, Ff. Виведені формули однозначно визначають залежність між довжинами ланок та положенням (кутом нахилу) виконавчого органу і можуть бути використані при програмуванні алгоритмів керування запропонованим механізмом.

Висновки. 1) Теоретичні дослідження впливу кута нахилу сонячних панелей на енергогенерацію з урахуванням статистичних даних [3, 4] підтверджують, що сонячний трекер на основі механізму паралельної структури може генерувати на 30% більше енергії у порівнянні з системами з постійним кутом встановлення панелей. 2) Запропонований метод керування за допомогою механізму з паралельною кінематикою типу «гексапод» дозволяє швидко змінювати орієнтацію сонячної панелі залежно від положення сонця. Механізм забезпечує високу жорсткість та допускає встановлення панелей значного розміру і маси. 3) Виведені аналітичні залежності між положенням виконавчого органу та довжинами кінематичних ланок гексапода можуть бути безпосередньо використані при розробці алгоритмів керування.

Список літератури

1. Як правильно встановити сонячні панелі. *Axiomplus* : веб-сайт. URL: <https://axiomplus.com.ua/news/ustanovka-solnechnyh-panelej/> (дата звернення: 27.04.2024).
2. Встановлення сонячних батарей. Варіанти конструкцій під монтаж сонячних батарей. URL: https://mysolarenergyua.blogspot.com/2017/03/blog-post_30.html (дата звернення: 27.04.2024).
3. Кут нахилу сонячних батарей та його вплив на техніко-економічні показники експлуатації сонячної електростанції. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/Енергетична-ефективність-1.pdf> (дата звернення: 27.04.2024).
4. Mustafa Engin. Controller Design for Parallel Mechanism Solar Tracker. *Machines*. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 372. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/372> (дата звернення: 27.04.2024).
5. Валявський І.А., Лисенко О.В., Лисенко І.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навч. посіб. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 281 с.
6. The use of parallel structure mechanisms to ensure efficient solar energy generation / O. V. Lysenko, I. A. Valiavskiy, O. I. Skibinskyi . *Development areas of modern technical sciences for a secure future society* : International scientific conference (December 25-26, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 19-22.
7. Weck M., Staimer D. Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, *Annals of CIRP*, 51/2/2002, p.671-683.
8. Zhang Dan. Parallel Robotic Machine Tools . New York : Springer US, 2010. XII, 219 p.
9. Merlet J.-P. Parallel Robots . Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers ; Springer, 2012. XVII, 372 p.

References

1. *Axiomplus*. (2024). How to properly install solar panels. URL: <https://axiomplus.com.ua/news/ustanovka-solnechnyh-panelej/> [in Ukrainian].
2. Mysolarenergyua. (2024). Solar battery installation options. URL: https://mysolarenergyua.blogspot.com/2017/03/blog-post_30.html [in Ukrainian].
3. The tilt angle of solar batteries and its effect on the economic performance of a solar power plant. (2024). URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/> [in Ukrainian].
4. Mustafa, Engin. (2023). Controller Design for Parallel Mechanism Solar Tracker. *Machines*, 11(3), 372. <https://doi.org/10.3390/machines11030372>.
5. Valiavskiy, I.A., Lysenko, O.V., & Lysenko, I.A. (2023). Technological equipment with parallel kinematics. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi [in Ukrainian].

6. Lysenko, O. V., Valiavskiy, I. A., & Skibinskyi, O. I. (2024). The use of parallel structure mechanisms to ensure efficient solar energy generation . Development areas of modern technical sciences for a secure future society : International scientific conference (December 25-26, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : Baltija Publishing, P. 19-22.
7. Weck, M., & Staimer, D. (2002). Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, *Annals of CIRP*, 51/2/2002, p.671-683
8. Zhang, Dan. (2010). Parallel Robotic Machine Tools . New York : Springer US, XII, 219 p.
9. Merlet, J.-P. (2012). Parallel Robots . Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers ; Springer, XVII, 372 p.

Ivan Valiavskiy, PhD tech. sci., **Oleksandr Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Efficiency of Solar Energy Generation Using Parallel Structure Mechanisms

The purpose of this article is to improve the efficiency of solar power plants by changing the position of the solar panel depending on the position of the sun using parallel structure mechanisms, and to determine analytical dependencies between the position of the executive body (solar panel) and the lengths of the kinematic links of the hexapod mechanism for use in the control system.

Solar panels operate most efficiently when their surface is perpendicular to the sun's rays. The greater the angle between the panel surface and sunlight direction, the greater the efficiency losses. Two-axis solar tracking systems satisfy the 90° requirement but are expensive, consume energy, and require large areas. Therefore, stationary structures are predominantly used as a compromise. Statistical data show that adjusting the tilt angle four times a year allows capturing 98–99% of the energy of a full tracking system. The article proposes using a hexapod-type parallel structure mechanism as the basis for a solar tracker. The mechanism consists of a movable actuator ABC hinged to the fixed element KNM via six single-movable kinematic links. By adjusting the lengths of these links, the required spatial orientation of the solar panel is achieved. The mechanism is built on a spatial truss, ensuring high structural rigidity and the ability to support large and heavy panels. The inverse kinematics problem was solved to derive control equations. The position of the moving coordinate system is described by three linear coordinates (x_0 , y_0 , z_0) and three Euler angles (φ , θ , ψ). Using coordinate transformation matrices, closed-form formulas for calculating all six kinematic link lengths (Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, Ff) from the given panel position were derived.

Theoretical research confirms that a solar tracker based on a parallel structure mechanism can generate 30% more energy compared to systems with a fixed installation angle. The derived formulas uniquely determine the relationship between kinematic link lengths and the panel's tilt angle and can be directly used in programming control algorithms for the proposed mechanism. The approach combines adequate energy efficiency with high structural rigidity and can serve as the basis for developing cost-effective solar tracking systems.

solar energy generation, solar tracker, hexapod, parallel structure mechanism, Stewart platform

Одержано (Received) 11.04.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.04.2026

Прийнято до друку (Approved) 23.04.2026