

Т.О. ДЕРКАЧЕНКО, О.В. ПОЛИВОДА, А.О. ДЕРКАЧЕНКО
Херсонський національний технічний університет

РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРА ЯК МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

У статті представлено результати дослідження, спрямованого на підвищення точності та ефективності систем відстеження положення Сонця за рахунок розроблення комплексної математичної моделі механізму сонячного трекера як системи просторового позиціонування з двома ступенями свободи. Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до ефективності фотоелектричних установок, де навіть невеликі похибки орієнтації панелей призводять до суттєвих енергетичних утрат. Запропоновано модель, яка на відміну від традиційних спрощених підходів ураховує реальну кінематику механізму, включаючи зміщення осей обертання, люфти у шарнірах, відстані між центрами обертання, пружні деформації конструкції та асиметрію маси панелі. На основі аналітичних рівнянь прямих і зворотних кінематичних перетворень побудовано математичну модель, яка описує взаємозв'язок між керуючими кутами приводів та орієнтацією панелі у тривимірному просторі. Для компенсації геометричних і конструктивних похибок розроблено модуль корекції, що реалізує двоступеневий підхід: геометричну компенсацію (урахування зміщення осей) і функціональну адаптацію (коригування параметрів на основі експериментального калібрування). Програмна реалізація моделі дає змогу розраховувати компенсовані кути в реальному часі, використовуючи чисельні методи зворотної кінематики, зокрема метод Ньютона – Рафсона. Проведене моделювання показало, що запропонований підхід забезпечує стабільну орієнтаційну точність до $\pm 0,2^\circ$, що підвищує ефективність збору сонячної енергії на 3–5% порівняно з типовими системами без компенсації. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції аналітичного та сенсорного підходів у єдину гібридну систему стеження. Запропонована модель може бути використана як теоретична та практична основа для створення інтелектуальних трекерів нового покоління з функціями самокалібрування, адаптації до конструктивних змін і корекції похибок у процесі експлуатації, що є важливим кроком у розвитку автономних енергоефективних систем керування сонячними панелями.

Ключові слова: сонячний трекер, механізм паралельної структури, математична модель, керування рухом, планування траєкторії, зворотна задача кінематики, пряма задача кінематики, модуль корекції, орієнтація панелі, енергоефективність.

T.O. DERKACHENKO, O.V. POLYVODA, A.O. DERKACHENKO
Kherson National Technical University

DEVELOPMENT OF A COMPLEX MATHEMATICAL MODEL OF THE SOLAR TRACKER SPATIAL POSITIONING SYSTEM AS A PARALLEL STRUCTURE MECHANISM

The paper presents the results of a study aimed at improving the accuracy and efficiency of solar tracking systems through the development of a complex mathematical model of a solar tracker mechanism as a spatial positioning system with two degrees of freedom. The relevance of this work is determined by the increasing requirements for the efficiency of photovoltaic installations, where even minor orientation errors cause significant energy losses. Unlike traditional simplified approaches, the proposed model considers the real kinematic behavior of the mechanism, including the displacement of rotation axes, backlash in joints, distances between rotation centers, elastic deformations of structural elements, and asymmetry of the panel mass. Based on analytical equations of direct and inverse kinematics, a mathematical model has been developed that describes the relationship between the control angles of the actuators and the spatial orientation of the panel. To compensate for geometric and structural errors, a correction module has been designed implementing a two-level approach: geometric compensation (considering the displacement of the axes) and functional adaptation (adjusting parameters based on experimental calibration). The model has been implemented as a computational algorithm capable of real-time correction using the Newton–Raphson method for inverse kinematics. Simulation results confirmed that the proposed approach provides a stable orientation accuracy of up to $\pm 0.2^\circ$, improving energy collection efficiency by 3–5% compared to standard systems without compensation. The developed method demonstrates adaptability to mechanical deviations and environmental variations, ensuring long-term precision tracking. The obtained results can be used to design hybrid tracking systems that combine analytical modeling and sensor feedback, as well as to create intelligent next-generation solar trackers capable of self-calibration and real-time correction of mechanical and operational deviations. The proposed mathematical and algorithmic framework forms a foundation for developing highly efficient, adaptive, and reliable solar tracking mechanisms for autonomous photovoltaic systems.

Key words: solar tracker, parallel structure mechanisms, mathematical model, motion control, trajectory planning, inverse kinematics problem, forward kinematics problem, correction module, panel orientation, energy efficiency.

Постановка проблеми

Сучасні технології відновлюваної енергетики активно розвиваються в напрямі підвищення ефективності використання сонячного випромінювання [1]. Одним із ключових чинників, що впливають на ефективність фотоелектричних систем, є правильна орієнтація сонячних панелей відносно положення Сонця. Для цього застосовуються системи стеження за Сонцем (сонячні трекари), які автоматично змінюють просторове положення панелей, забезпечуючи їх перпендикулярність до сонячних променів упродовж дня [2]. Проте більшість існуючих підходів базується або на спрощених аналітичних моделях, що не враховують кінематику реального механізму, або на емпіричних алгоритмах, точність яких знижується зі зміни зовнішніх умов, що спричиняє розбіжність між теоретичним і фактичним положенням панелі та знижує ефективність накопичення енергії [3].

Тому актуальними є завдання розроблення комплексної математичної моделі механізму сонячного трекара, яка відображає просторову геометрію приводу, а також створення модуля корекції, що забезпечує уточнення орієнтації системи на основі поточних параметрів та вимірювань. Поєднання цих двох компонентів дасть змогу не лише описати рух елементів системи, а й забезпечити адаптивне вдосконалення точності наведення панелі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд існуючих методів показує, що сучасні системи відстеження за принципом роботи системи поділяються на пасивні та активні. Пасивні трекари працюють без зовнішнього джерела енергії, використовуючи термогідролічні ефекти або зміну об'єму робочої рідини під дією сонячного нагрівання. Такі системи мають просту конструкцію, не потребують електроніки та придатні для невеликих автономних установок, проте їх точність обмежена і залежить від температурних умов [4]. Активні трекари використовують електричні або гідравлічні приводи, сенсори положення та мікроконтролери, що дає змогу досягати високої точності орієнтації незалежно від погодних умов [4]. За кількістю ступенів свободи активні системи поділяються на одноосьові (зміна положення за азимутом) та двоосьові (зміна за азимутом і висотою). Двоосьові трекари забезпечують найвищу ефективність накопичення енергії, але відзначаються складнішою механікою, більшою вартістю та підвищеним енергоспоживанням приводів.

У сучасних системах управління положенням панелей використовується кілька основних типів алгоритмів: астрономічні, сенсорні, гібридні та алгоритми оптимізації за потужністю [5; 6].

Астрономічні алгоритми засновані на математичних моделях руху Сонця (наприклад, SPA – Solar Position Algorithm) та враховують географічні координати, дату, час, нахил земної осі та забезпечують теоретично точне визначення азимуту й кута підйому Сонця. Їхньою перевагою є незалежність від сенсорів освітлення, проте вони не враховують локальні перешкоди (наприклад, хмарність або тіньові зони), а також вимагають точного налаштування годинника та GPS-координат.

Сенсорні алгоритми використовують фотоприймачі (LDR, фотодіоди або фототранзистори), які вимірюють інтенсивність світла в різних напрямках. Порівняння сигналів дає змогу визначити напрямок найбільшої освітленості та відповідно повернути панель. Цей метод простий у реалізації, не потребує складних обчислень, але залежить від стану сенсорів, їх розташування та погодних умов.

Гібридні алгоритми поєднують обидва підходи: базову орієнтацію здійснюють за астрономічними розрахунками, а сенсори використовуються для періодичної корекції положення. Такий підхід забезпечує високу точність, стабільність та адаптивність системи навіть за змінної хмарності.

Алгоритми оптимізації за потужністю (MPPT) використовуються у поєднанні з трекарами для підтримання максимальної потужності фотоелектричного модуля, що дає змогу адаптивно регулювати роботу інвертора та кут нахилу панелі для досягнення пікової продуктивності.

Таким чином, огляд існуючих методів показує, що сучасні системи стеження базуються на поєднанні точних математичних моделей і сенсорного контролю, що дає змогу ефективно використовувати сонячну енергію впродовж усього дня, підвищуючи коефіцієнт корисного використання енергії на 20–40% порівняно зі стаціонарними установками. Проте при всій своїй ефективності більшість таких систем розраховані на ідеалізовані умови функціонування, де механізм вважається ідеальним – без люфтів, із точними осями обертання, симетричним центром мас і без конструктивних спотворень.

Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення точності та ефективності систем стеження за положенням Сонця шляхом розроблення комплексної математичної моделі двохосового механізму сонячного трекера та модуля корекції кутів, які враховують реальні конструктивні неточності, люфти, зміщення осей і центру мас, об'єднаних у єдиний алгоритм аналітичного та програмного відтворення процесу стеження з метою оптимізації збору сонячної енергії.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: побудувати аналітичну модель орієнтації сонячного трекера з урахуванням азимутального та висотного кутів Сонця; розробити кінематичну модель механізму з двома ступенями свободи, яка описує просторове положення робочої поверхні; створити алгоритмічний модуль корекції, що на основі відхилення між теоретичним і вимірним положенням виконує уточнення кутів керування; інтегрувати зазначенні компоненти у єдину систему моделювання для оцінювання точності та підвищення ефективності відслідковування.

Вирішення поставлених завдань дає змогу сформулювати універсальну основу для побудови високоточних систем сонячного відслідковування, здатних адаптивно коригувати орієнтацію механізму відповідно до реальних умов роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для забезпечення точного орієнтування сонячної панелі у напрямку Сонця необхідно мати не лише алгоритм обчислення його координат, а й математичну модель механізму, яка описує геометричну та кінематичну взаємодію між приводами та рухом платформи. Така модель дає змогу враховувати реальні конструктивні параметри трекера: розташування осей, довжини важелів, зміщення центрів обертання тощо.

Розглянемо сонячний трекер, що складається з двох серводвигунів, які забезпечують двохосове позиціонування (3D-модель механізму з позначеними точками та осями наведено на рис. 1): перший двигун (вісь O_1) відповідає за азимутальний поворот панелі навколо вертикальної осі (рух зі сходу на захід); другий двигун (вісь O_2) відповідає за нахил по висоті (рух у площині північ – південь).

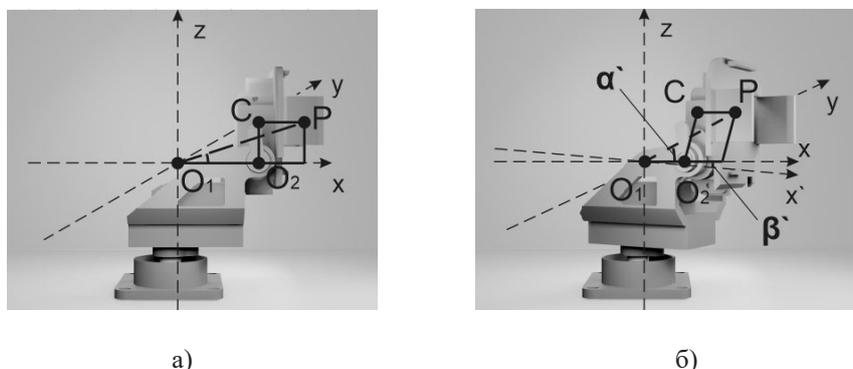


Рис. 1. 3D-модель механізму сонячного трекера: а) положення елементів механізму в початковому стані; б) положення елементів механізму в процесі руху

Особливістю конструкції є те, що осі обертання першого і другого двигунів не перетинаються в одній точці, тобто механізм має два різні центри обертання. Відстань між цими центрами позначимо через L . Це зміщення суттєво впливає на кінематику руху, тому його необхідно враховувати під час розрахунків кутів орієнтації.

Положення сонячної панелі у просторі можна описати вектором r , який задає координати центра площини панелі в глобальній системі координат (X, Y, Z) . Рух системи описується послідовністю двох обертань: навколо вертикальної осі O_1 на кут α (азимутальний кут) та навколо горизонтальної осі O_2 на кут β (кут підйому або нахил).

Загалом вектор положення після подвійного обертання визначається матричним добутком:

$$\text{Загалом вектор положення після подвійного обертання визначається матричним добутком:} \\ r = R_z(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot r_0, \quad (1)$$

де r_0 – початковий вектор нормалі до панелі (наприклад, у напрямку осі Z), $R_z(\alpha)$ – матриця обертання навколо осі Z , $R_y(\beta)$ – матриця обертання навколо осі Y .

У канонічному вигляді матриці обертань мають вигляд:

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Таким чином, напрямок нормалі до площини панелі в будь-який момент часу визначається добутком:

$$n = R_z(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot n_0, \quad (3)$$

де $n_0 = [0, 0, 1]^T$ – нормаль у початковому положенні.

Однак така модель є спрощеною, оскільки не враховує зміщення між осями обертання. Якщо центри осей O_1 і O_2 розташовані на відстані L , то під час обертання навколо другої осі відбувається додаткове зміщення центра панелі, що впливає на кінематичні залежності.

Щоб урахувати цей ефект, розглянемо випадок, коли друга вісь O_2 зміщена відносно першої O_1 на вектор $L = [L_x, L_y, L_z]$. Після обертання навколо першої осі положення центру осі O_2 у глобальній системі координат визначається як

$$O_2 = R_z(\alpha)L. \quad (4)$$

Після цього відбувається обертання навколо локальної горизонтальної осі на кут β . Координати центра панелі P визначаються за формулою

$$P = R_z(\alpha)(R_y(\beta)r_p + L), \quad (5)$$

де r_p – поточний (орієнтований) вектор нормалі панелі від другої осі O_2 до центра панелі.

Якщо панель має розміри $a \times b$ і центр тяжіння розташований на відстані l від осі O_2 , то навіть невелике зміщення L призводить до похибки у визначенні реального напрямку нормалі. Таким чином, для правильної орієнтації потрібно враховувати не лише кути α і β , а й геометрію зв'язку між ними.

Для кожного моменту часу положення Сонця на небі визначається через кут висоти h та азимутальний кут A_s . Тоді ідеальна нормаль до панелі повинна бути спрямована у вектор

$$n_s = n_{s,x}, n_{s,y}, n_{s,z} = \begin{bmatrix} \cos h \sin A_s \\ \cos h \cos A_s \\ \sin h \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Завдання системи полягає у тому, щоб орієнтувати фактичну нормаль $n(\alpha, \beta, L)$ максимально близько до n_s , що формулюється як мінімізація функції похибки:

$$E(\alpha, \beta) = \|n_s - n(\alpha, \beta, L)\|^2, \quad (7)$$

де $\|\cdot\|$ – евклідова норма вектора.

Побудована вище модель описує пряму кінематику механізму, тобто визначає положення панелі у просторі за відомими керуючими кутами приводів. Однак у практичних системах стеження часто виникає обернене завдання: потрібно, навпаки, знайти такі значення кутів повороту, за яких площина панелі буде точно зорієнтована у напрямку Сонця. Це завдання становить основу моделі зворотної кінематики, суть якої полягає у визначенні кутів α і β , за яких площина панелі буде спрямована у напрямку Сонця. Для ідеального механізму (без зміщення) рішення має вигляд

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_{s,x}}{n_{s,y}}\right), \quad \beta = \arctan\left(\frac{n_{s,z}}{\sqrt{n_{s,x}^2 + n_{s,y}^2}}\right). \quad (8)$$

Однак за наявності реального зсуву осей потрібно додати компенсаційні члени, що враховують вектор \mathbf{L} . Для малих кутів відхилення це можна записати у вигляді лінійної апроксимації:

$$\alpha' = \alpha + k_\alpha \cdot \frac{L_y}{l}, \quad \beta' = \beta + k_\beta \cdot \frac{L_z}{l}, \quad (9)$$

де k_α, k_β – коефіцієнти компенсації, визначені експериментально або в процесі калібрування, l – відстань від центра панелі до осі O_2 .

Для точнішого розрахунку можна використати векторне рівняння положення панелі й розв'язати його відносно кутів α та β чисельним методом, наприклад методом Ньютона – Рафсона. Таке рішення є основою для програмного модуля зворотної кінематики, який у реальному часі розраховує необхідні кути повороту приводів за відомими координатами Сонця.

Як було зазначено під час опису кінематичної структури механізму, у реальних конструкціях сонячних трекерів осі обертання не завжди перетинаються в одній точці. Через конструктивні особливості платформи два серводвигуни, які забезпечують повороти за азимутом і висотою, розташовані на різних рівнях і мають власні центри обертання.

У результаті цього навіть за правильно розрахованих кутів орієнтації фактичне положення сонячної панелі після обертання не збігається з теоретично обчисленим. Окрім того, на кінцеве положення впливають такі фактори, як люфти у з'єднаннях, пружні деформації кронштейнів, асиметрія маси панелі, похибки датчиків положення та неточність редукторів. Ці похибки є накопичувальними: за кожного циклу позиціонування вони можуть відхилити панель на кілька градусів, що призводить до втрати 2–5% ефективності накопичення енергії.

Щоб компенсувати ці відхилення і забезпечити стабільну точність наведення, у структурі системи передбачено модуль математичної корекції кутів повороту, який реалізує дві взаємопов'язані функції: геометричну компенсацію (урахування реального зміщення осей, довжин важелів і відстаней між точками кріплення приводів) та функціональну адаптацію (коригування теоретично розрахованих кутів на основі фактичних даних сенсорів або виміряних відхилень під час калібрування).

Розглянемо побудову цього модуля на основі системи координат із центром у першій осі обертання O_1 . Відстань між осями позначимо через L , а відстань від другої осі O_2 до центра панелі – l . Після обертання на кути α (азимут) та β (нахил) реальне положення центра панелі буде зміщене від ідеального положення. З урахуванням цього зміщення отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} X = L\cos\alpha + l\cos\alpha\cos\beta, \\ Y = L\sin\alpha + l\sin\alpha\cos\beta, \\ Z = l\sin\beta, \end{cases} \quad (10)$$

де X, Y, Z – координати центра панелі в глобальній системі координат.

У разі ідеального механізму ($L = 0$) ці рівняння спрощуються, але за ненульового L виникає систематична похибка у проєкції на горизонтальну площину. Для усунення цього ефекту

вводиться модифікований набір кутів α' і β' , які забезпечують правильне наведення, навіть якщо осі не перетинаються.

Щоб визначити необхідну корекцію, розглянемо задачу орієнтації панелі у напрямку одиничного вектора на Сонце $\mathbf{n}_s = [n_x, n_y, n_z]^T$. Після обертання на кути α' і β' нормаль до панелі матиме вигляд:

$$\mathbf{n}(\alpha', \beta') = \begin{bmatrix} \cos \alpha' \sin \beta' \\ \sin \alpha' \sin \beta' \\ \cos \beta' \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Завдання полягає у тому, щоб знайти такі α' і β' , за яких виконується умова

$$\mathbf{n}(\alpha', \beta') = \mathbf{n}_s, \quad (12)$$

з урахуванням додаткового зсуву осей. Якщо осі рознесені на відстань L , то між реальним і теоретичним напрямками нормалі виникає похибка \mathbf{n} , яку можна описати як

$$\mathbf{n} = f(L, \alpha, \beta). \quad (13)$$

Використовуючи розкладання у ряд Тейлора для малих відхилень, отримаємо наближені формули корекції:

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha + \frac{L}{l} \sin \beta \cos \alpha, \\ \beta' = \beta + \frac{L}{l} \cos \beta \sin \alpha, \end{cases} \quad (14)$$

де α, β – розраховані теоретичні кути з астрономічного алгоритму; α', β' – скориговані кути, які фактично подаються на серводвигуни; $\frac{L}{l}$ – безрозмірний коефіцієнт зміщення, що характеризує геометрію платформи.

Ці рівняння враховують основний вплив відстані між осями та зміну нахилу панелі в результаті комбінованого руху. Для точнішого опису система може бути розширена нелінійними членами другого порядку, які враховують перекося за великих кутів нахилу, але для більшості побутових і лабораторних систем наведена модель забезпечує достатню точність.

Для програмної реалізації корекційний модуль інтегрується між астрономічним блоком розрахунку положення Сонця (наприклад, SPA) і блоком керування сервоприводами. Алгоритм його роботи полягає у послідовному виконанні таких процедур:

1. Отримання від SPA координат Сонця (кут висоти (h) та азимут (A_s)).
2. Перетворення отриманих координат на теоретичні кути обертання панелі (α, β).
3. Виконання геометричної корекції згідно з рівнянням (9).
4. Урахування додаткових поправок, отриманих під час калібрування (табличних або апроксимованих).
5. Передача скоригованих кутів (α', β') до контролера приводів.

Додатково модуль може виконувати самокорекцію в реальному часі, використовуючи зворотний зв'язок від сенсорів положення панелі (наприклад, гіроскопів або датчиків нахилу). Якщо фактичний кут відрізняється від розрахованого більше ніж на допустиме значення (ϵ), модуль автоматично обчислює нову пару (α', β') і коригує положення. Таким чином, система зберігає високу точність навіть за зміни механічних характеристик у процесі експлуатації.

Ключовим етапом роботи корекційного модуля є калібрування, яке дає змогу визначити реальні параметри механізму: відстань L , радіус l , початкове положення осей і допустимі межі руху.

Калібрування проводиться експериментально. Панель устанавлюється у контрольне

положення (наприклад, напрямок на південь під кутом 45°), після чого фіксуються фактичні значення кутів сервоприводів і порівнюються з теоретичними кутами, що обчислюються за допомогою астрономічної моделі. На основі різниці формується таблиця корекційних коефіцієнтів (k_α, k_β) для різних діапазонів кутів, після чого корекційний модуль може використовувати апроксимовану функцію корекції:

$$\alpha' = \alpha + f_\alpha(\alpha, \beta), \beta' = \beta + f_\beta(\alpha, \beta), \quad (15)$$

де f_α, f_β – експериментально визначені функції похибок, що описують індивідуальні особливості конкретного механізму.

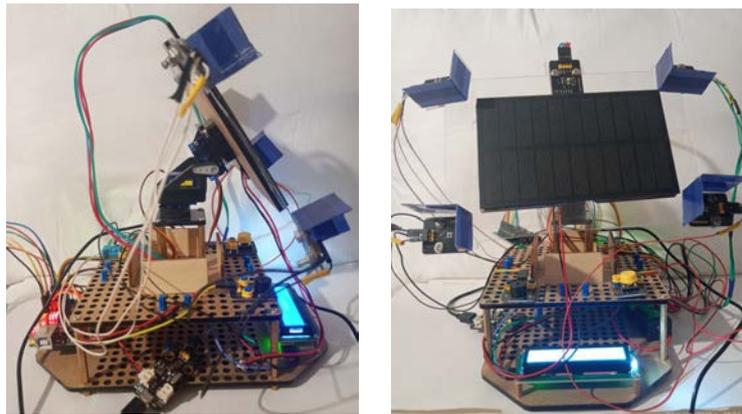


Рис. 2. Зовнішній вигляд сонячного трекера KS0530

Для перевірки отриманої математичної моделі з вбудованим блоком корекції аналітичні вирази було перетворено на програмний продукт, придатний для чисельних обчислень, моделювання та керування реальним пристроєм. Результати моделювання наведено на рис. 3 та 4.

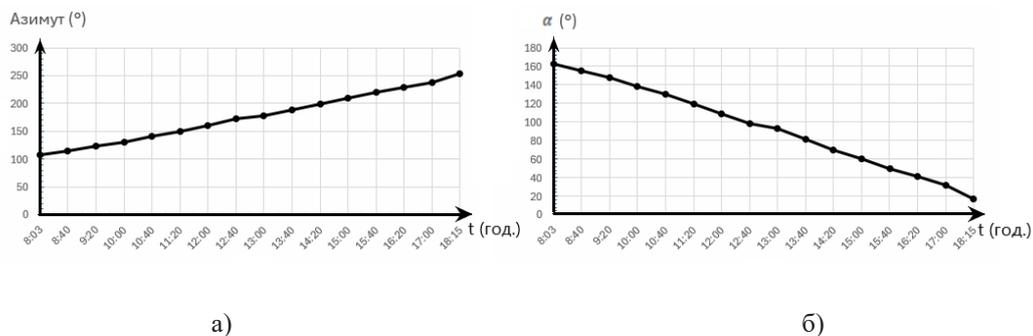


Рис. 3. Графіки динаміки кутів повороту двигуна, що відповідає за азимутальний поворот (рух зі сходу на захід): а) орієнтація панелі відносно осі Z; б) відповідний кут повороту двигуна навколо осі Z

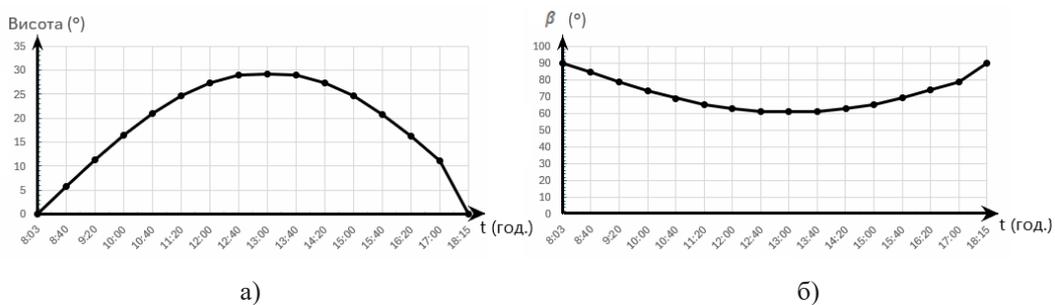


Рис. 4. Графіки динаміки кутів повороту двигуна, що відповідає за нахил по висоті (рух у площині північ – південь): а) орієнтація панелі відносно осі Y; б) відповідний кут повороту двигуна навколо осі Y

Використання математичного модуля корекції кутів дало змогу збільшити точність орієнтації панелі до $\pm 0,2^\circ$ навіть за наявності механічних зміщень та зменшити накопичувальну похибку, що особливо важливо для систем, які працюють без перезавантаження протягом тривалого часу. Запропонована модель легко налаштовується під різні типи трекерів (рамні, карданні, сферичні) та забезпечує можливість інтеграції із сенсорними системами, що забезпечує повноцінний гібридний режим роботи.

Висновки

У статті розроблено комплексну математичну модель, яка враховує як кінематичну структуру реального механізму, так і геометричні похибки, властиві практичним конструкціям. Розроблена математична модель механізму дає змогу описати взаємозв'язок між кутами приводів і фактичним положенням панелі у тривимірному просторі. Модель побудовано на основі матричного представлення обертань і враховує зміщення осей обертання, що забезпечує точніший розрахунок реальної орієнтації поверхні панелі. На її основі сформовано алгоритм зворотної кінематики, який обчислює необхідні кути повороту приводів для наведення панелі на Сонце. Розроблено модуль корекції кутів, який компенсує геометричні та конструктивні похибки механізму та враховує відстань між осями обертання, довжини важелів, пружні деформації та інші реальні фактори. Використовуючи наближені рівняння компенсації, модуль коригує керуючі кути в реальному часі, забезпечуючи точне наведення панелі на Сонце навіть за відхилень у конструкції. Запропонована система поєднує переваги аналітичного підходу та експериментального калібрування. Це дає змогу не лише підвищити точність орієнтації, а й забезпечити адаптивність трекера до змінних умов експлуатації: зносу деталей, температурних деформацій і механічних люфтів. Таким чином, реалізація математичної моделі та модуля корекції кутів створює основу для побудови інтелектуального механізму відстеження Сонця, що поєднує високу точність, енергоефективність і стійкість до конструктивних неточностей. Це відкриває перспективу для подальшого розвитку автономних систем управління сонячними панелями нового покоління.

Список використаної літератури

1. Ho Soonmin, Lomi Abraham, Edmund C. Okoroigwe, Leonardo Rodríguez Urrego. Investigation of Solar Energy: The Case Study in Malaysia, Indonesia, Colombia and Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. № v9i1. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i1.8699.g7620>
2. Кулик Я.А., Шкуран М.В. Система стеження за рухом Сонця [Електронний ресурс]. *Матеріали XLVI Науково-технічної конференції факультету комп'ютерних систем і автоматики*, м. Вінниця, 29–30 березня 2017. Вінниця, 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2402/2618>
3. Marthoz Angulo-Calderón, Iván Salgado-Tránsito, Iván Trejo-Zúñiga, Carlos Paredes-Orta, Sajjad Kesthkar, Arturo Díaz-Ponce. Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules. *Applied Sciences (MDPI)*. 2022. Т. 12, № 5. <https://doi.org/10.3390/app12052625>
4. Беліков К.О. Теплогідролічний слідкуючий привод позиціонування приймача геліостанції. *DSPACE ELAKPI Ренозитарій КІП ім. Ігоря Сікорського*. 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/044e7f90-796d-492e-a5d9-9258d32ae470>
5. Rizal Y., Wibowo S.H., Feriyadi. Application of Solar Position Algorithm for Sun-Tracking System. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 32. P. 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.021>
6. Bouzakri H., Abbou A., Abousserhane Z., El Idrissi R. Equatorial Solar Tracker Control Using MPPT Technique. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2022. № v12i2. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i2.12953.g8463>

References

1. Soomin, Ho., Lomi, A., Okoroigwe, E.C., & Rodríguez Urrego, L. (2019). Investigation of Solar Energy: The Case Study in Malaysia, Indonesia, Colombia and Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Research*, v9i1. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i1.8699.g7620> [in English].
2. Kulyk, Ya.A., & Shkuran, M.V. (2017). Systema stezhennia za rukhom Sontsia [System of Solar Movement Tracking]. Materialy XLVI Naukovo-tekhnichnoi konferentsii fakultetu kompiuternykh system i avtomatyky 2017 [*Proceedings of the XLVI Scientific and Technical Conference of the Faculty of Computer Systems and Automation 2017*]. Vinnytsia. Retrieved from <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2402/2618> [in Ukrainian].
3. Angulo-Calderón, M., Salgado-Tránsito, I., Trejo-Zúñiga, I., Paredes-Orta, C., Kesthkar, S., & Díaz-Ponce, A. (2022). Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules. *Applied Sciences (MDPI)*, 12 (5). <https://doi.org/10.3390/app12052625> [in English].
4. Bielikov, K.O. (2025). Teplohidravlichnyi slidkuiuchyi pryvid pozytsionuvannia pryimacha heliostantsii [Thermal hydraulic tracking drive for positioning the solar station receiver]. *DSpace ELAKPI Repozytarii KPI im. Ihoria Sikorskoho* [DSpace ELAKPI Repository of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute]. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/items/044e7f90-796d-492e-a5d9-9258d32ae470> [in Ukrainian].
5. Rizal, Y., Wibowo, S., & Feriyadi, H. (2013). Application of Solar Position Algorithm for Sun-Tracking System. *Energy Procedia*, 32, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.021> [in English].
6. Bouzakri, H., Abbou, A., Abousserhane, Z., & El Idrissi, R. (2022). Equatorial Solar Tracker Control Using MPPT Technique. *International Journal of Renewable Energy Research*, v12i2. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i2.12953.g8463> [in English].

Деркаченко Тимофій Олегович – студент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету. E-mail: timadk03@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6680-4040.

Поливода Оксана Валеріївна – к.т.н, доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету. E-mail: pov81@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6323-3739.

Деркаченко Анатолій Олегович – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету. E-mail: toldk98@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0443-0329.

Derkachenko Timofyy Olehovych – Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics of the Kherson National Technical University. E-mail: timadk03@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6680-4040.

Polyvoda Oksana Valeriivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics of the Kherson National Technical University. E-mail: pov81@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6323-3739.

Derkachenko Anatolii Olehovych – Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics of the Kherson National Technical University. E-mail: toldk98@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0443-0329.

Отримано: 28.10.2025

Рекомендовано: 01.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

