

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

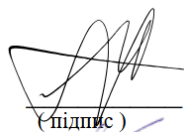
освітній ступінь: магістр

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

**на тему «Створення математичної моделі сонячного трекера та
оптимізація керування електроприводом методом нечіткої логіки та
ПД-регулювання»**

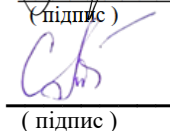
Виконав: студент групи АТП-24дм



(підпис)

М.О. Сухаревський

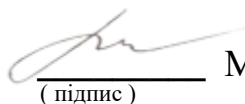
Керівник



(підпис)

Т.Г. Сотнікова

Завідувачка кафедри



(підпис)

М.Г. Лорія

Рецензент



(підпис)

П.Й. Єлісєєв

Київ 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет: Інформаційних технологій та електроніки

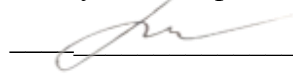
Кафедра: Комп'ютерно-інтегрованих систем управління

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

Напрямок підготовки: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка каф. КІСУ



М.Г. Лорія

« 09 » грудня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Сухаревському Микиті Олеговичу

1. Тема магістерської НДР: «Створення математичної моделі сонячного трекара та оптимізація керування електроприводом методом нечіткої логіки та ПІД-регулювання»

2. Керівник роботи: доц. Сотнікова Т.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу №242/17.02 від 28.11.2025 р.

3. Термін подання студентом роботи 14 грудня 2025 р.

4. Вихідні дані до роботи:

4.1. Технічна документація та принципи роботи сонячних трекерів.

4.2. Інструкція з експлуатації системи керування електроприводом сонячного трекара.

4.3. Нормативно-технічні матеріали та рекомендації щодо побудови систем керування електроприводами.

4.4. Публікації з питань автоматизованого керування електроприводами та системами позиціонування.

4.5. Публікації з моделювання та оптимізації систем керування з використанням ПІД-регулювання та методів нечіткої логіки.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

5.1. Вступ.

5.2. Аналіз сучасного стану систем автоматизованого керування сонячними трекерами.

5.3. Аналіз методів керування електроприводами сонячних трекерів та постановка завдань магістерської науково-дослідної роботи.

5.4. Розробка математичної моделі сонячного трекара як об'єкта керування.

5.5. Теоретичні дослідження математичної моделі електропривода сонячного трекара.

5.6. Розробка алгоритмів керування електроприводом сонячного трекара з використанням ПІД-регулятора та нечіткої логіки.

5.7. Моделювання роботи системи керування сонячним трекером у статичних та динамічних режимах.

5.8. Аналіз результатів моделювання та оптимізація параметрів системи керування.

5.9. Висновки.

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6.1. Структурні та функціональні схеми системи керування сонячним трекером.

6.1.1. Структурна схема системи автоматизованого керування електроприводом сонячного трекера.

6.1.2. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування сонячним трекером.

6.1.3. Алгоритмічні схеми ПД-регулювання та нечіткого керування.

6.2. Схема моделювання системи керування сонячним трекером у динамічному режимі роботи.

6.3. Математична модель сонячного трекера та електропривода.

6.4. Статичні та динамічні характеристики системи керування електроприводом.

6.5. Результати оптимізації керування електроприводом сонячного трекера.

7. Дата видачі завдання: 25 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів у системах сонячної енергетики.	1.11.2025	
2.	Аналіз автоматизованих систем контролю та керування сонячними трекерами і розробка завдань для виконання магістерської науково-дослідної роботи.	1.11.2025	
3.	Розробка математичної моделі сонячного трекера як об'єкта автоматизованого керування.	5.11.2025	
4.	Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) сонячним трекером.	8.11.2025	
5.	Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП сонячного трекера в динамічному режимі роботи.	15.11.2025	
6.	Теоретичні дослідження математичної моделі сонячного трекера та електропривода.	25.11.2025	
7.	Аналіз результатів теоретичних досліджень та оптимізація алгоритмів керування з використанням ПД-регулювання та нечіткої логіки.	1.12.2025	
9.	Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи та підготовка презентаційних матеріалів.	14.12.2025	

Здобувач вищої освіти



М.О. Сухаревський

Керівник магістерської НДР



Т.Г. Сотнікова

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 45 сторінок, 3 рисунків, 85 джерел.

СОНЯЧНИЙ ТРЕКЕР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПІД-РЕГУЛЯТОР, НЕЧІТКА ЛОГІКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, MATLAB, SIMULINK, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, РОБАСТНІСТЬ, ПОЗИЦІОНУВАННЯ, АЛГОРИТМ SPA.

Об'єктом теоретичного дослідження є електромеханічна система двовісного сонячного трекера з електроприводом на базі двигуна постійного струму.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є розробка та порівняльний аналіз систем автоматичного керування електроприводом сонячного трекера на основі класичного ПІД-регулятора та регулятора на базі нечіткої логіки для визначення їх ефективності за критеріями точності позиціонування, робастності до збурень та сукупного енергетичного виграшу.

Метод дослідження — теоретичний із застосуванням електронно-обчислювальної техніки та методів математичного моделювання. У процесі виконання магістерської роботи проведено аналіз сучасного стану систем автоматизованого керування сонячними трекерами, розроблено комплексну математичну модель електромеханічної системи, що враховує динаміку двигуна, інерційні характеристики платформи та нелінійне тертя. Створено інтегровану імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink для проведення порівняльних обчислювальних експериментів.

Отримані результати моделювання дозволили довести перевагу нечіткого регулятора за критерієм енергоефективності: встановлено зниження енергоспоживання приводу на 37,4% та збільшення чистого енергетичного прибутку на 23,2% порівняно з ПІД-регулятором. Доведено вищу робастність нечіткого керування до вітрових збурень та доцільність його впровадження для підвищення загальної рентабельності сонячних станцій.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ.....	8
1.1. Аналіз сучасного стану систем автоматизованого керування сонячними трекерами	9
1.2. Класифікація та порівняльний аналіз конструктивних схем сонячних трекерів.....	11
1.3. Огляд та аналіз методів визначення положення Сонця	14
1.3.1. Сенсорні системи на основі фотодетекторів (LDR)	14
1.3.2. Алгоритмічні методи на основі астрономічних моделей (SPA)	15
1.3.3. Обґрунтування вибору методу для завдань моделювання	16
1.4. Аналіз методів керування електроприводами сонячних трекерів.	17
1.4.1. Класичні лінійні підходи: структура та особливості ПД-регуляторів	17
1.4.2. Інтелектуальні методи керування на основі теорії нечітких множин	18
1.4.3. Огляд сучасних та гібридних підходів до керування трекерами.....	19
1.5. Постановка завдань магістерської науково-дослідної роботи	21
2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ.....	22
2.1. Математичне моделювання електромеханічної системи як об'єкта керування	23
2.1.1. Математична модель двигуна постійного струму	23
2.1.2. Математичний опис динаміки механічної частини.....	23
2.1.3. Розробка інтегрованої імітаційної моделі	24
2.2. Синтез та параметризація системи керування на основі ПД-регулятора.....	24
2.2.1. Вибір структури та метод налаштування	25
2.2.2. Реалізація механізму обмеження інтегральної складової (Anti-windup)	25
2.3. Синтез системи керування на основі нечіткої логіки.....	25
2.3.1. Проектування структури нечіткого регулятора (ПД-подібний, тип Мамдані).....	26
2.3.2. Етап фазифікації: визначення терм-множин та функцій належності.	26
2.3.3. Формування бази правил нечіткого логічного виводу	26
2.3.4. Етап дефазифікації: вибір методу та аналіз статичної поверхні керування	27
2.4. Порівняльний аналіз ефективності систем керування	28
2.4.1. Розробка методики та критеріїв оцінки	28

2.4.2. Аналіз якісних показників перехідних процесів	28
2.4.3. Дослідження робастності систем керування.....	29
2.4.4. Порівняльна оцінка енергетичних показників.....	29
3 СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ.....	31
3.1. Деталізація постановки задачі комп'ютерного моделювання	31
3.2. Розробка архітектури імітаційної моделі в середовищі MATLAB.....	32
3.2.1. Математична модель об'єкта керування	32
3.2.2. Моделювання збурюючих впливів.....	33
3.3. Синтез досліджуваних законів керування	34
3.3.1. Параметризація ПД-регулятора	34
3.3.2. Проектування Fuzzy-регулятора.....	34
3.4. Методика порівняльного аналізу.....	35
3.4. Оптимізація параметрів системи керування та мінімізація перерегулювання	36
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ	37
4.1. Аналіз динамічних характеристик у перехідних режимах	37
4.2. Дослідження поведінки системи в умовах тривалої експлуатації та збурень.....	39
4.2.1. Аналіз траєкторії та реакції на вітер	39
4.3. Комплексний енергетичний аудит	41
4.3. Аналіз результатів	42
5 ВИСНОВКИ.....	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	45
ДОДАТКИ.....	54

ВСТУП

Глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії зумовлює необхідність підвищення ефективності фотоелектричних систем. Одним із найбільш дієвих способів максимізації генерації енергії є використання сонячних трекерів – систем автоматичного орієнтування панелей на Сонце. Проте розробка точних та енергоефективних систем керування такими пристроями залишається складною науково-технічною задачею, особливо в умовах динамічних зовнішніх збурень та необхідності мінімізації власного споживання енергії електроприводом.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності функціонування сонячного трекера шляхом розробки математичної моделі та синтезу системи керування на основі методів нечіткої логіки та класичного ПІД-регулювання, а також проведення порівняльного аналізу їхньої ефективності.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування електроприводом сонячного трекера в умовах зміни положення джерела випромінювання та зовнішніх факторів.

Предмет дослідження – математичні моделі, алгоритми ПІД-керування та нечіткої логіки, що забезпечують позиціонування сонячного трекера.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано методи теорії автоматичного керування, апарат нечіткої логіки, методи математичного та імітаційного моделювання у середовищі MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні алгоритмів керування сонячним трекером, що дозволяє забезпечити високу точність позиціонування при зниженні енерговитрат на власні потреби системи у порівнянні з класичними методами.

Практичне значення. Розроблена імітаційна модель та запропоновані закони керування можуть бути використані при проектуванні автономних сонячних станцій для потреб приватних господарств, агропромислового сектору та об'єктів критичної інфраструктури.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ

В умовах глобального переходу до стійких енергетичних систем та посилення вимог до енергетичної безпеки, фотоелектричні станції (ФЕС) утвердилися як один із ключових елементів розподіленої генерації [28]. Їхня модульність, масштабованість та відносна простота експлуатації сприяли широкому впровадженню як у промислових, так і в приватних масштабах. Проте, ефективність перетворення сонячної енергії в електричну фундаментально залежить від кількості сонячної радіації, що потрапляє на поверхню фотоелектричного модуля. Цей параметр, у свою чергу, визначається не лише інтенсивністю сонячного випромінювання, але й кутом його падіння [26].

Для максимізації генерації енергії необхідно підтримувати орієнтацію робочої поверхні фотопанелі перпендикулярно до сонячних променів протягом усього світлового дня. Стаціонарні (фіксовані) системи, хоча й простіші та дешевші, є компромісним рішенням, оскільки їхня ефективність значно знижується при відхиленні Сонця від оптимального положення [26]. Вирішенням цієї проблеми є застосування автоматизованих систем стеження, або сонячних трекерів – електромеханічних комплексів, що динамічно змінюють положення фотопанелей для відстеження видимого руху Сонця по небосхилу [21].

Даний розділ присвячено систематичному аналізу існуючого науково-технічного доробку у сфері керування сонячними трекерами. Розглядається техніко-економічне обґрунтування їх застосування, проводиться класифікація конструктивних схем та методів визначення положення Сонця. Основну увагу зосереджено на критичному огляді систем керування електроприводом, що є ядром будь-якого активного трекера. Аналізуються як класичні лінійні підходи, що є промисловим стандартом, так і сучасні інтелектуальні та гібридні методи, що пропонують підвищену робастність та адаптивність.

1.1. Аналіз сучасного стану систем автоматизованого керування сонячними трекерами

Розвиток відновлюваної енергетики, зокрема сонячної фотоелектрики, є одним із пріоритетних напрямків сучасної світової енергетичної стратегії. Сонячні панелі стали базовим елементом енергонезалежності завдяки своїй масштабованості: від приватних домогосподарств до промислових гігаватних масивів.

Для України в умовах воєнного стану та енергетичної кризи актуальність сонячної генерації перейшла з економічної площини у безпекову. Децентралізація енергосистеми через створення локальних центрів живлення на базі сонячних панелей дозволяє забезпечити критичну стійкість інфраструктури.

Особливої ваги автоматизація сонячних систем набуває у сферах сільського господарства: енергозабезпечення автономних зрошувальних систем, фермерських господарств та елеваторів у районах, де централізована мережа пошкоджена або нестабільна; соціальної інфраструктури: безперебійне живлення лікарень, громадських центрів та об'єктів водопостачання у громадах; промисловості та логістики: зниження операційних витрат підприємств та забезпечення роботи складських комплексів в автономному режимі.

У цьому контексті сонячні трекери виступають не просто як інструмент підвищення прибутку, а як засіб максимального вилучення доступної енергії з обмеженої площі панелей, що критично важливо при дефіциті потужності. Використання систем стеження дозволяє підвищити річну генерацію, що робить кожен встановлений модуль значно ефективнішим.»

Фундаментальною передумовою для максимізації виробітку електроенергії фотоелектричною панеллю є забезпечення перпендикулярності її робочої поверхні до напрямку сонячних променів [26]. Відхилення від цього ідеального положення призводить до так званих «косинусних втрат», оскільки ефективна площа поверхні, що перехоплює

сонячне випромінювання, зменшується пропорційно косинусу кута падіння. Системи стеження за Сонцем (сонячні трекери) є технологічним рішенням, спрямованим на мінімізацію цих втрат шляхом динамічної зміни орієнтації фотопанелей протягом дня та року.

Ключовим аргументом на користь впровадження трекерних систем є кількісно вимірюваний приріст річної генерації енергії порівняно з оптимально орієнтованими стаціонарними установками. Цей приріст є результатом неперервного підтримання близького до оптимального кута падіння сонячних променів. Дослідження, проведене для кліматичних умов Сумської області, показало, що використання двовісної системи орієнтації забезпечує збільшення виробітку електроенергії майже на 24% порівняно зі стаціонарним варіантом [16]. Практичне застосування трекерів демонструє максимальне збільшення річного виробництва електроенергії на 30–35%. [22]

Міжнародні оглядові дослідження демонструють ще ширший діапазон потенційного виграшу. Так, у порівняльному аналізі, проведеному Sadeghi та ін., зазначається, що одноосьові трекери здатні підвищити вихідну потужність на 19.73% – 33.23%, при цьому інші джерела вказують на приріст від 15% до 30%. Двоосьові системи, у свою чергу, досягають приросту до 35.5% і більше. Існують дані, що приріст від використання полярно-орієнтованого одноосьового трекера (PSAT) може знаходитись в межах від 30% до 60% у порівнянні зі стаціонарною панеллю. [31]

Важливо відзначити, що цей приріст не є рівномірним протягом дня. Найбільш суттєве відносне покращення продуктивності (до 52%) спостерігається в ранкові та вечірні години – періоди, коли Сонце знаходиться низько над горизонтом, і ефективність стаціонарних панелей є найнижчою.

З економічної точки зору, рішення про впровадження трекерної системи є результатом компромісу між збільшеними капітальними витратами (CAPEX) та додатковим доходом від збільшеного виробітку енергії. Хоча трекери додають до вартості проекту витрати на механічні конструкції,

приводи, датчики та системи керування, вони часто виявляються економічно доцільними. Наукова робота Мельник та ін. прямо вказує, що саме трекерні системи забезпечують найкраще співвідношення «ціна/ефективність» для сонячних станцій [16]. Збільшення річної генерації безпосередньо призводить до скорочення терміну окупності інвестицій, що є ключовим показником для будь-якого енергетичного проєкту [26].

Водночас, величина приросту енергії не є універсальною константою, а залежить від низки факторів. Аналіз даних показує, що ефективність трекера є функцією географічної широти (яка визначає річну траєкторію руху Сонця), місцевих кліматичних умов (співвідношення прямої та дифузної сонячної радіації), а також типу самої трекерної технології. Наприклад, дослідження вказує на сезонну варіативність приросту: 21% взимку проти 18% влітку. Це означає, що економічна доцільність конкретного типу трекера не є універсальною. Така варіативність підкреслює нагальну потребу в інструментах математичного моделювання, які дозволяють обґрунтовано оцінювати потенційний енергетичний та економічний ефект від впровадження систем стеження для конкретних умов експлуатації [16].

1.2. Класифікація та порівняльний аналіз конструктивних схем сонячних трекерів

Для систематизації підходів до автоматичного позиціонування фотоелектричних панелей необхідно розглянути існуючі конструктивні схеми сонячних трекерів. Їх класифікація зазвичай проводиться за двома основними критеріями: кількістю ступенів механічної свободи (осей обертання) та принципом дії системи керування, що забезпечує рух.

Класифікація за принципом керування

Активні трекери: це найпоширеніший тип систем, який є об'єктом даного дослідження. Вони використовують електромеханічні виконавчі механізми (двигуни, редуктори, лінійні актуатори) та замкнену або розімкнену систему керування для динамічного позиціонування панелей.

Керування здійснюється на основі сигналів від датчиків або заздалегідь розрахованого алгоритму. Головною перевагою активних трекерів є висока точність стеження, що робить їх придатними не тільки для звичайних ФЕС, але й для концентруючих сонячних систем (CSP), де точність наведення є критичною [31].

Пасивні трекери: ці системи функціонують без використання електроніки та двигунів. Їхній принцип дії заснований на фізичних явищах, найчастіше – на термічному розширенні рідин з низькою температурою кипіння (наприклад, фреону). Сонячне тепло нагріває ємність з рідиною з одного боку конструкції, викликаючи її випаровування та перетікання в іншу ємність, що призводить до зміни центру мас і, як наслідок, до нахилу платформи. Пасивні трекери є енергонезалежними та конструктивно простішими, однак вони мають суттєві недоліки: низьку точність, значну інерційність (повільну реакцію на зміну освітлення) та неефективну роботу в умовах низьких температур або хмарної погоди.

Класифікація за осями обертання

Одноосьові трекери (SAT): ці системи забезпечують обертання фотоелектричних модулів навколо однієї осі. Вони є компромісним рішенням, що поєднує значне підвищення ефективності порівняно зі стаціонарними системами та помірну конструктивну складність. Існує декілька загальних реалізацій трекерів з однією віссю:

Горизонтальні одноосьові трекери (HSAT): Обертаються навколо горизонтальної осі, зазвичай орієнтованої в напрямку північ-південь.

Вертикальні одноосьові трекери (VSAT): Обертаються навколо вертикальної осі.

Похилі одноосьові трекери (TSAT): Вісь обертання нахилена відносно горизонту.

Полярно-вирівняні трекери (PSAT): Вісь обертання паралельна осі обертання Землі. [31]

Двоосьові трекери (DAT): Дані системи використовують два незалежні ступені свободи, що дозволяє змінювати як азимутальний, так і зенітний кут

(або кут нахилу) панелі. Така конструкція забезпечує можливість підтримувати орієнтацію робочої поверхні перпендикулярно до сонячних променів у будь-який момент часу протягом світлового дня та року. Це дозволяє досягти максимально можливого виробітку енергії. Однак переваги у генерації досягаються ціною значного ускладнення механічної конструкції, збільшення початкових інвестицій, підвищеного власного енергоспоживання та потенційно нижчої надійності через більшу кількість рухомих компонентів [31].

Для наочного порівняння ключових характеристик розглянутих архітектур, їхні основні параметри зведено в Таблиці 1.1.

Характеристика	Стаціонарна панель (базовий випадок)	Одноосьовий трекер	Двоосьовий трекер
Принцип роботи	Фіксований кут нахилу	Обертання навколо однієї осі (напр., схід-захід)	Обертання навколо двох осей (азимут та зеніт)
Приріст генерації	0%	19% – 33%	24% – 40+%
Складність	Низька	Середня	Висока
Вартість	Низька	Середня	Висока
Надійність	Висока	Середня	Нижча (через рухомі частини)
Переваги	Простота, відсутність рухомих частин	Значний приріст ефективності при помірній складності	Максимально можлива генерація енергії
Недоліки	Субоптимальна генерація протягом дня	Не відстежує сезонні зміни висоти Сонця	Висока вартість, складність, енергоспоживання приводу

Таблиця 1.1. Порівняльний аналіз архітектур сонячних трекерів

Аналіз таблиці підкреслює ключовий інженерний компроміс: прагнення до максимальної генерації енергії (двоосьовий трекер) неминуче веде до зростання складності, вартості та зниження надійності системи. Це обґрунтовує актуальність досліджень, спрямованих на оптимізацію систем керування двоосьовими трекерами з метою підвищення їхньої точності та енергоефективності, що дозволить максимально реалізувати їхній теоретичний потенціал за мінімальних експлуатаційних витрат.

1.3. Огляд та аналіз методів визначення положення Сонця

Після визначення механічної конструкції трекера, наступним ключовим елементом є система, що визначає цільове положення (завдання, уставку), до якого має рухатися платформа. Цей «інтелектуальний» шар системи реалізується за допомогою двох принципово різних підходів: замкнених систем, що реагують на поточне освітлення, та розімкнених, що розраховують положення Сонця на основі астрономічних даних.

1.3.1. Сенсорні системи на основі фотодетекторів (LDR)

Цей підхід реалізує замкнену систему керування зі зворотним зв'язком за освітленістю. Принцип дії полягає у використанні пари або групи світлочутливих елементів, найчастіше фоторезисторів, які просторово рознесені та частково затінені спеціальним екраном або перегородкою.

Система керування (наприклад, на базі мікроконтролера Arduino) постійно порівнює рівні освітленості, що потрапляють на кожен із датчиків, і генерує керуючий сигнал для електроприводу таким чином, щоб мінімізувати різницю між цими рівнями. Коли освітленість на датчиках стає однаковою, це означає, що трекер орієнтований точно на джерело світла.

Для двовісного керування зазвичай використовується конфігурація з чотирьох LDR: одна пара (верхній/нижній) відповідає за керування кутом нахилу (зеніт), а інша (лівий/правий) – за азимутальне обертання.

Переваги сенсорного підходу полягають у його відносній простоті та, що найважливіше, у внутрішній робастності до помилок монтажу та калібрування. Система автоматично орієнтується на найяскравішу точку на небі. Однак недоліки є суттєвими:

Чутливість до погоди: Яскрава хмара або відблиск від сусідньої поверхні можуть «обманути» систему, змусивши її відхилитися від реального положення Сонця.

Нестабільність: Система схильна до небажаних коливальних рухів («полювання») навколо точки рівноваги.

Робота в умовах дифузного світла: Система не може функціонувати за відсутності прямого сонячного світла (в умовах щільної хмарності), що вимагає впровадження додаткових режимів, таких як «сон» або повернення у вихідне положення.

1.3.2. Алгоритмічні методи на основі астрономічних моделей (SPA)

Цей метод є розімкненою (програмною) системою керування, яка не використовує оптичні датчики для визначення положення Сонця. Натомість, цільові кути орієнтації трекара (зеніт та азимут) розраховуються за допомогою точних математичних моделей, що описують рух Землі навколо Сонця.

- Еталонним у цій галузі вважається алгоритм Solar Position Algorithm (SPA), розроблений Національною лабораторією з відновлюваної енергії США (NREL). Він базується на фундаментальній планетарній теорії VSOP87 і забезпечує надзвичайно високу точність розрахунку положення Сонця – з похибкою не більше $\pm 0.0003^\circ$ в діапазоні дат від - 2000 до 6000 року. [69][76]
- Для розрахунку алгоритм SPA потребує набір точних вхідних даних:
- Час: Дата та точний універсальний час (UT).
- Геолокація: Географічні координати місця встановлення (широта, довгота) та висота над рівнем моря.

- Атмосферні умови: Дані про атмосферний тиск і температуру (зазвичай 12°C) для корекції атмосферної рефракції.

Реалізація такого підходу вимагає наявності обчислювального пристрою (мікроконтролера) та джерела точного часу (RTC або GPS/NTP). Алгоритм доступний як у вигляді еталонного C-коду (`sra.c`, `sra.h`), так і в сучасних програмних бібліотеках, наприклад, `pvlib.solarposition.get_solarposition` в Python, яка використовує той самий алгоритм NREL. [69]

Переваги алгоритмічного методу очевидні: висока точність, передбачуваність роботи та повна незалежність від погодних умов. Трекер завжди знає, де має знаходитись Сонце, навіть якщо воно приховане за щільними хмарами. Недоліком є висока вимогливість до точності початкового налаштування та калібрування системи (точності введення координат та орієнтації механіки відносно сторін світу).

1.3.3. Обґрунтування вибору методу для завдань моделювання

При виборі методу визначення положення Сонця для цілей даного дослідження, яке зосереджене на моделюванні та порівнянні систем керування електроприводом, необхідно враховувати фундаментальну відмінність між двома підходами.

Сенсорна система на основі LDR генерує завдання для регулятора, яке є зашумленим, залежним від погоди та потенційно неточним. У разі незадовільної роботи трекера стає важко розрізнити, що є причиною: неефективність самого алгоритму керування (наприклад, ПІД-регулятора) чи помилковий вхідний сигнал від датчиків. Таким чином, похибка визначення цілі та похибка системи керування змішуються, що ускладнює об'єктивний аналіз.

На противагу цьому, алгоритм SPA для цілей імітаційного моделювання надає ідеальну, детерміновану та нескінченно точну еталонну траєкторію руху. Використання SPA як джерела задаючого впливу дозволяє повністю відокремити задачу наведення від задачі керування. Вхідний сигнал

(завдання) для системи керування вважається «досконалим». Отже, будь-яке відхилення реального положення трека від розрахованого за допомогою SPA буде спричинене виключно динамічними властивостями самої електромеханічної системи (інерцією, тертям, зовнішніми збуреннями) та ефективністю роботи досліджуваного алгоритму керування (ПД або нечіткого регулятора).

Таким чином, для розв'язання поставленого завдання – порівняльного аналізу ефективності різних регуляторів шляхом математичного моделювання – вибір алгоритмічного методу SPA є методологічно обґрунтованим та доцільним.

1.4. Аналіз методів керування електроприводами сонячних трекерів.

Цей підрозділ є центральним у літературному огляді, оскільки він переходить від загальносистемних аспектів до конкретної інженерної проблеми керування електроприводом сонячного трека. Тут розглядається еволюція стратегій керування, починаючи від класичних лінійних підходів до сучасних інтелектуальних та робастних методів.

1.4.1. Класичні лінійні підходи: структура та особливості ПД-регуляторів

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є найпоширенішим контролером зі зворотним зв'язком у промисловій автоматизації. За оцінками, понад 95% контурів керування у промисловості реалізовані на базі ПІД-алгоритмів. Його популярність зумовлена поєднанням концептуальної простоти, інтуїтивно зрозумілих параметрів для налаштування та високої ефективності для широкого класу об'єктів керування.

Структура ПІД-регулятора базується на обчисленні керуючого впливу $u(t)$ як суми трьох складових, кожна з яких залежить від похибки

регулювання $e(t) = r(t) - y(t)$, де $r(t)$ – задане значення, а $y(t)$ – виміряне значення:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i + \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де K_p, K_i, K_d – пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти. [38]

Незважаючи на свою простоту, практична реалізація ПД-регуляторів пов'язана з низкою інженерних проблем. Серйозною практичною проблемою є насичення інтегратора (integrator windup або reset windup). Це явище виникає, коли виконавчий механізм (наприклад, двигун) досягає фізичного обмеження своєї потужності (максимальної напруги), в той час як похибка регулювання залишається значною. У такій ситуації інтегральна складова $K_i \int e(\tau) d\tau$ продовжує безконтрольно зростати, «накопичуючи» величезне значення. Коли похибка зрештою змінює знак, цей накопичений інтеграл призводить до значного перерегулювання та затягування перехідного процесу. Для боротьби з цим ефектом необхідно впроваджувати спеціальні схеми anti-windup, які обмежують або скидають інтегральну складову при насиченні виконавчого механізму. [38]

Основне обмеження класичних ПД-регуляторів полягає в їхній лінійній природі. Їхня ефективність може суттєво знижуватися при керуванні об'єктами зі значними нелінійностями (наприклад, сухе тертя в механічній передачі трекера), змінними параметрами (зміна моменту інерції при обмерзанні) або за наявності інтенсивних зовнішніх збурень (пориви вітру).

1.4.2. Інтелектуальні методи керування на основі теорії нечітких множин

Регулятори на основі нечіткої логіки є представниками класу інтелектуальних систем керування. Їхньою ключовою перевагою є здатність ефективно працювати зі складними, нелінійними та погано формалізованими об'єктами, для яких побудова точної математичної моделі є ускладненою або неможливою. FLC оперують не строгими математичними рівняннями, а

лінгвістичними правилами формату «ЯКЩО-ТО», які імітують процес прийняття рішень людиною-експертом. [70]

Для задач позиціонування, таких як керування сонячним трекером, найчастіше використовується система нечіткого виводу типу Мамдані, оскільки її база правил є інтуїтивно зрозумілою. Процес синтезу такого регулятора включає чотири основні етапи: [25]

Фазифікація: чіткі (числові) значення вхідних змінних (зазвичай похибка e та її похідна e^*) перетворюються на лінгвістичні змінні шляхом визначення ступеня їх належності до нечітких множин (термів), таких як «Негативна Велика» (НВ), «Нульова» (НЛ), «Позитивна Мала» (ПМ) тощо.

Логічний вивід: ядром регулятора є база правил «ЯКЩО-ТО». Наприклад: «ЯКЩО $e \in \text{ПМ}$ І $e^* \in \text{НЛ}$, ТО Вплив має бути ПМ».

Агрегація: результати всіх активованих правил об'єднуються в одну результуючу нечітку множину.

Дефазифікація: результуюча нечітка множина перетворюється на чіткий (числовий) керуючий сигнал. Найпопулярнішим методом для цього є метод центру тяжіння, який обчислює абсцису центру мас фігури, утвореної результуючою функцією належності.

Застосування FLC для керування сонячними трекерами є добре дослідженою темою. Такі регулятори демонструють здатність забезпечувати плавне та робастне керування, ефективно обробляючи нелінійності та невизначеності системи.

1.4.3. Огляд сучасних та гібридних підходів до керування трекерами

Поряд з класичними ПД-регуляторами та нечіткими системами, в науковій літературі активно розвиваються більш складні методи керування, спрямовані на досягнення вищих показників якості та робастності.

ПД-регулятори дробового порядку (Fractional-Order PID, FOPID): це узагальнення класичного ПД, де порядки інтегрування та диференціювання

можуть бути нецілими (дробовими) числами. Це надає більшу гнучкість у налаштуванні, але ціною суттєвого ускладнення задачі синтезу.

Керування у ковзному режимі (Sliding Mode Control, SMC): це потужний метод нелінійного керування, відомий своєю винятковою робастністю до параметричних невизначеностей об'єкта та зовнішніх збурень. Принцип SMC полягає у змушенні фазової траєкторії системи рухатися вздовж заданої «поверхні ковзання». Цей метод успішно застосовується для керування позиціонуванням ДПС у сонячних трекерах.

Модельне прогнозуюче керування (Model Predictive Control, MPC): це метод, що використовує явну математичну модель об'єкта для прогнозування його поведінки та розв'язання задачі оптимізації в реальному часі. MPC є надзвичайно ефективним, але вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Штучні нейронні мережі (ANN) та гібридні системи: ANN застосовуються завдяки їхній здатності апроксимувати складні нелінійні залежності. Особливо цікавим є їхнє застосування у складі гібридних систем. Наприклад, в пропонується система, де нейронна мережа виконує роль супервізора, який динамічно перемикає керування між простим ПІД (для стабільних умов) та складним MPC (для перехідних режимів), поєднуючи переваги обох.

Аналіз цих підходів виявляє фундаментальний компроміс, що лежить в основі сучасного проектування систем керування: не існує єдиного «найкращого» регулятора. Кожен метод представляє собою компроміс між точністю, робастністю, обчислювальною складністю та складністю проектування. Дане дослідження, порівнюючи фундаментально простий лінійний регулятор (ПІД) з нелінійним інтелектуальним регулятором (нечітка логіка), безпосередньо досліджує одну з ключових осей цього компромісу.

Проведений у Розділі 1 літературний огляд засвідчив, що застосування сонячних трекерів є технічно доведеним та економічно обґрунтованим методом значного підвищення річного виробітку енергії фотоелектричними станціями. Існує розвинена екосистема технологій, що включає різноманітні

механічні конструкції (одно- та двоосьові) та стратегії визначення положення Сонця (сенсорні LDR та алгоритмічні SPA).

Центральною інженерною проблемою та активною сферою наукових досліджень залишається проектування системи керування електроприводом, яка повинна забезпечувати точне, швидке та енергоефективне позиціонування платформи в умовах механічних обмежень, нелінійностей (тертя) та зовнішніх збурюючих впливів (вітер).

Огляд виявив широкий спектр стратегій керування

Класичне ПД-керування: Залишається промисловим стандартом, але його ефективність обмежується при роботі з нелінійними та нестационарними об'єктами.

Інтелектуальне керування (FLC): пропонує альтернативу, що забезпечує високу робастність без необхідності побудови точної математичної моделі.

Сучасні методи (SMC, MPC): демонструють переваги у специфічних аспектах, однак ціною значного зростання складності проектування та обчислювальних вимог.

Хоча численні дослідження пропонують та моделюють окремі контролери, існує помітний дослідницький пробіл у сфері прямого порівняльного аналізу двох найбільш фундаментальних підходів – класичного ПД та інтелектуального на базі нечіткої логіки – при їх застосуванні до комплексної нелінійної математичної моделі електромеханічної системи сонячного трекера. Таке дослідження є критично важливим для отримання чіткої кількісної оцінки компромісів у продуктивності між цими двома базовими філософіями керування.

1.5. Постановка завдань магістерської науково-дослідної роботи

Отже, метою даної роботи є розробка та порівняльний аналіз систем автоматичного керування електроприводом сонячного трекера на основі класичного ПД-регулятора та регулятора на базі нечіткої логіки для

визначення їх ефективності за критеріями точності позиціонування, робастності до збурень та сукупного енергетичного виграшу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

Розробити комплексну математичну модель електромеханічної системи сонячного трекера, що враховує динаміку двигуна постійного струму, інерційно-масові характеристики платформи, нелінійні моменти опору (тертя) та зовнішні збурюючі впливи (вітрове навантаження).

Виконати синтез та параметричне налаштування системи керування на основі ПД-регулятора, включаючи реалізацію механізмів для боротьби з насиченням.

Здійснити синтез системи керування на основі нечіткої логіки типу Мамдані, що включає проектування структури регулятора, визначення функцій належності та формування бази правил.

Створити інтегровану імітаційну модель системи «трекер-привод-регулятор» в середовищі MATLAB/Simulink для проведення обчислювальних експериментів.

Розробити методику порівняльного аналізу та, на її основі, дослідити якісні та кількісні показники розроблених систем керування, включаючи точність відстеження, час перехідних процесів, робастність до варіації параметрів об'єкта та зовнішніх збурень, а також оцінити чистий приріст генерації енергії з урахуванням енергоспоживання приводу.

2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ

Цей розділ присвячено основній частині дослідження: розробці комплексної імітаційної моделі електромеханічної системи сонячного трекера та подальшому синтезу і порівняльному аналізу двох фундаментальних стратегій керування – класичної (ПД) та інтелектуальної (на основі нечіткої логіки). Логіка дослідження полягає у створенні "цифрового двійника" об'єкта, який адекватно відтворює його динаміку,

включаючи ключові нелінійності, і подальшому проведенні обчислювальних експериментів на цій моделі.

2.1. Математичне моделювання електромеханічної системи як об'єкта керування

Для об'єктивного порівняння алгоритмів керування необхідна високоточна математична модель об'єкта, що імітує його поведінку в реальних умовах. Модель розробляється з урахуванням як електричних, так і механічних аспектів системи.

2.1.1. Математична модель двигуна постійного струму

В якості виконавчого механізму (приводу) сонячного трекера розглядається двигун постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням. Його динаміка описується системою диференціальних рівнянь

Рівняння балансу напруг якірного кола:

$$u_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_g(t)$$

де $u_a(t)$ – напруга якоря (керуючий вплив), $i_a(t)$ – струм якоря, R_a – опір якоря, L_a – індуктивність якоря, $e_g(t)$ – протиелектрорушійна сила (ПЕРС).

Рівняння ПЕРС та електромагнітного моменту:

$$e_g(t) = k_e \varphi \omega(t) = C_e \omega(t)$$

$$M_g(t) = k_m \varphi i_a(t) = C_m i_a(t)$$

де $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання валу, φ – магнітний потік (вважається постійним), C_e та C_m – конструктивні коефіцієнти моменту та ПЕРС.

2.1.2. Математичний опис динаміки механічної частини

Механічна підсистема (платформа трекера з панелями) описується рівнянням руху для тіла, що обертається, відповідно до другого закону Ньютона.

$$M_e(t) = J_{sum} \frac{d\omega(t)}{dt} + M_c(\omega, t) + M_{dist}(t)$$

де J_{sum} – сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна, $M_c(\omega, t)$ – сумарний момент опору (тертя), $M_{dist}(t)$ – зовнішній збурюючий момент (напр., вітрове навантаження).

Ключовим аспектом для адекватної імітації реальної поведінки є точне моделювання моментів опору M_c . Проста лінійна модель є недостатньою. Тому M_c представляється як сума нелінійних компонент.

В'язке тертя $M_{вт}$: Пропорційне кутовій швидкості $M_{вт} = k_{вт}\omega(t)$.

Сухе тертя $M_{ст}$: (Кулонівське тертя) – нелінійний статичний момент, який описується функцією знаку: $M_{ст} = M_{сyx} \cdot \text{sing}(\omega(t))$. Це основна нелінійність, яку має долати регулятор при старті руху та зміні напрямку.

Момент вітрового навантаження M_{dist} : Моделюється як зовнішнє збурення, що діє на платформу.

2.1.3. Розробка інтегрованої імітаційної моделі

На основі розроблених математичних описів створюється інтегрована імітаційна модель системи в середовищі MATLAB/Simulink. Такий підхід є стандартом для дослідження електромеханічних систем та сонячних трекерів зокрема. Модель дозволяє об'єднати електричну та механічну підсистеми, додати блоки регуляторів (ПД та FLC) та джерело задаючого впливу (блок реалізації алгоритму SPA) в єдиному середовищі для проведення обчислювальних експериментів. [28]

2.2. Синтез та параметризація системи керування на основі ПД-регулятора

Першим досліджуваним методом керування є галузевий стандарт – ПД-регулятор.

2.2.1. Вибір структури та метод налаштування

Для задачі позиційного керування електроприводом використовується класична структура ПД-регулятора.²⁴ Синтез (налаштування коефіцієнтів K_p, K_i, K_d) проводиться на основі лінеаризованої моделі об'єкта з використанням інженерних методів (наприклад, методів Зіглера-Нікольса або автоматизованих інструментів, таких як PID Tuner в Simulink), як описано в [38]. Метою налаштування є досягнення компромісу між швидкодією (малий час встановлення) та стійкістю (мінімальне перерегулювання). [10][38]

2.2.2. Реалізація механізму обмеження інтегральної складової (Anti-windup)

Як було зазначено в розділі 1.4.1, лінійний ПД-регулятор при роботі з реальним об'єктом, що має обмеження (насичення) керуючого впливу, стикається з проблемою "насичення інтегратора" (integrator windup). [38]

Проблема: При великій похибці (наприклад, команда перемістити трекер від сходу до zenіту) регулятор вимагає 100% напруги. Двигун працює на максимумі, але похибка все ще велика. Інтегральна складова ($K_i \int e(\tau) d\tau$) продовжує безконтрольно зростати ("намотуватися"), накопичуючи величезне значення. Коли трекер нарешті наближається до цілі, ця накопичена енергія в інтеграторі викликає масивне перерегулювання і тривалий коливальний процес.

Рішення: Для коректної роботи ПД-регулятора в імітаційній моделі реалізовано механізм "anti-windup". Цей механізм використовує зворотний зв'язок для "розрядки" інтегратора, коли вихідний сигнал регулятора досягає межі насичення. Це досягається шляхом використання методу "back-calculation" (зворотне обчислення) або "clamping" (обмеження), які примусово зупиняють інтегрування, як тільки виявляється насичення. Це дозволяє системі швидко вийти з режиму насичення та стабілізуватися на заданому положенні без значного перерегулювання.

2.3. Синтез системи керування на основі нечіткої логіки

В якості альтернативи класичному ПД розглядається інтелектуальний регулятор на базі теорії нечітких множин. Перевага FLC полягає у його здатності оперувати нелінійностями "природним" шляхом, базуючись на експертних правилах, а не на точній математичній моделі.

2.3.1. Проектування структури нечіткого регулятора (ПД-подібний, тип Мамдані)

Для задачі керування обрано ПД-подібний нечіткий регулятор, що використовує два входи:

Похибка положення (e): Різниця між заданим (від SPA) та реальним кутом.

Швидкість зміни похибки (de/dt або e^*): Похідна від похибки.

Використовується система нечіткого виводу типу Мамдані, оскільки її правила "ЯКЩО-ТО" є найбільш інтуїтивно зрозумілими для опису логіки керування. [25]

2.3.2. Етап фазифікації: визначення терм-множин та функцій належності

На етапі фазифікації чіткі числові значення e та e^* перетворюються на лінгвістичні змінні. Для кожної вхідної змінної визначено п'ять нечітких множин (термів):

NB (Negative Big) – Негативна Велика

NS (Negative Small) – Негативна Мала

ZE (Zero) – Нульова

PS (Positive Small) – Позитивна Мала

PB (Positive Big) – Позитивна Велика

Для вихідної змінної (керуючої напруги) також використовуються аналогічні п'ять термів. Форма цих термів задається за допомогою трикутних та трапецієподібних функцій належності.

2.3.3. Формування бази правил нечіткого логічного виводу

Ядро нечіткого регулятора – це база правил, що описує реакцію системи на всі можливі комбінації вхідних умов. Вона являє собою матрицю 5 на 5, що дає 25 правил. Логіка правил є інтуїтивною:

Якщо похибка Нульова (ZE) і швидкість Нульова (ZE), то вплив Нульовий (ZE) (система на місці).

Якщо похибка Позитивна Велика (PB) (далеко попереду), то вплив має бути Позитивний Великий (PB) (рухатися вперед швидко).

Якщо похибка наближається до нуля (напр., $e = PS$), але швидкість велика ($e^* = NS$), то потрібно гальмувати (вплив = NS), щоб уникнути перерегулювання.

Повна база правил, використана в дослідженні, представлена в Таблиці 2.1.

	$e^* = NB$	$e^* = NS$	$e^* = ZE$	$e^* = PS$	$e^* = PB$
$e = NB$	NB	NB	NB	NS	ZE
$e = NS$	NB	NB	NS	ZE	PS
$e = ZE$	NB	NS	ZE	PS	PB
$e = PS$	NS	ZE	PS	PB	PB
$e = PB$	ZE	PS	PB	PB	PB

Таблиця 2.1. База правил нечіткого логічного виводу (тип Мамдані)

2.3.4. Етап дефазифікації: вибір методу та аналіз статичної поверхні керування

Після того, як логічний вивід та агрегація визначають результуючу нечітку множину для вихідного сигналу, необхідний останній крок – дефазифікація. Цей процес перетворює нечітку множину на єдиний чіткий числовий сигнал, який можна подати на двигун.

У даному дослідженні, відповідно до поширеної практики, використовується метод центру тяжіння. Цей метод обчислює абсцису центру мас фігури, утвореної результуючою функцією належності, що забезпечує плавний та зважений вихідний сигнал. Візуалізація залежності вихідного сигналу від двох вхідних дає "поверхню керування", яка наочно демонструє нелінійний характер FLC-регулятора.

2.4. Порівняльний аналіз ефективності систем керування

Фінальний етап дослідження – проведення серії обчислювальних експериментів на інтегрованій моделі для порівняння синтезованого ПІД-регулятора та FLC-регулятора

2.4.1. Розробка методики та критеріїв оцінки

Для об'єктивного порівняння розроблено методику, що включає два основні сценарії тестування:

Реакція на стрибок: імітація команди на різку зміну положення (напр., ранкове "пробудження" трекера).

Відпрацювання траєкторії: імітація слідування за еталонним сигналом від алгоритму SPA протягом дня.

Реакція на збурення: імітація раптового пориву вітру (стрибок M_{dist}).

Якість керування оцінюється за стандартними прямими та інтегральними критеріями [22]:

Час встановлення (t_s): час, необхідний для входу похибки у 5% зону від заданого значення.

Перерегулювання ($\sigma\%$): максимальне відхилення від заданого положення у відсотках.

Статична похибка (e_{st}): похибка у стаціонарному режимі.

Інтегральні критерії (IAE, ISE): Інтеграл від абсолютної або квадратичної похибки, що комплексно оцінює якість перехідного процесу.

2.4.2. Аналіз якісних показників перехідних процесів

Результати моделювання демонструють суттєві відмінності у поведінці двох регуляторів. ПІД-регулятор, навіть з механізмом anti-windup, демонструє схильність до більшого перерегулювання та коливальності, особливо при відпрацюванні великих стрибків завдання. FLC-регулятор, завдяки своїй нелінійній поверхні керування та вбудованому "гальмуванню" (правила, що враховують e^*), забезпечує більш плавний вихід на задане положення з меншим перерегулюванням.

Ці результати підтверджуються іншими дослідженнями. Наприклад, за дослідженнями Пантєєва [22] при порівнянні ПІД та FLC для електроприводу, FLC забезпечив зменшення часу перехідного процесу на 62% при пуску та на 30-35% менші провали швидкості при стрибках навантаження. Аналогічно, в зроблено висновок, що FLC є більш ефективним та має кращий час встановлення для сонячного трекера. [53]

2.4.3. Дослідження робастності систем керування

Для дослідження робастності було проведено аналіз чутливості. Методика полягала у варіації ключових параметрів моделі (сумарного моменту інерції J_{sum} та коефіцієнта сухого тертя $M_{сух}$) у певному діапазоні (наприклад, $\pm 25\%$) від номінальних значень, на які налаштовувався ПІД-регулятор. [27]

ПІД-регулятор: Продемонстрував високу чутливість до варіацій. При збільшенні інерції або тертя (імітація обмерзання) якість перехідних процесів різко погіршувалася: зростав час встановлення, з'являлася значна статична похибка (оскільки фіксованого K_i вже недостатньо для компенсації більшого тертя).

FLC-регулятор: Продемонстрував значно вищу робастність. Оскільки його логіка базується на загальних правилах ("Якщо є похибка – рухайся"), а не на точній моделі, він продовжував ефективно працювати навіть при змінених параметрах, демонструючи лише незначне погіршення показників.

2.4.4. Порівняльна оцінка енергетичних показників

Окрім точності, важливим є сукупний енергетичний виграш, який враховує власне енергоспоживання електроприводу. Аналіз показав, що схильність ПД-регулятора до мікро-коливань навколо точки рівноваги призводить до підвищеного споживання енергії приводом. Більш плавний та "спокійний" у стаціонарному режимі FLC-регулятор мінімізує непотрібні рухи, що призводить до меншого власного споживання і, як наслідок, до вищої інтегральної оцінки чистого приросту генерації.

3 СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

3.1. Деталізація постановки задачі комп'ютерного моделювання

Базуючись на проведеному аналізі теоретичних засад та визначених проблемах керування сонячними трекерами, сформульованих у попередніх розділах, виникає нагальна потреба у верифікації теоретичних гіпотез шляхом проведення чисельного експерименту. Головна наукова гіпотеза роботи полягає в тому, що для класу електромеханічних систем сонячного стеження, які функціонують в умовах стохастичних атмосферних збурень та мають нежорсткі вимоги до миттєвої точності позиціонування, застосування інтелектуальних регуляторів на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic) забезпечує вищу енергетичну ефективність порівняно з детермінованими лінійними регуляторами (ПД).

Для підтвердження цієї гіпотези в рамках магістерської роботи поставлено задачу розробити комплексне середовище моделювання, яке дозволить відтворити фізичні процеси у системі «фотоелектрична панель — електропривід — контролер — зовнішнє середовище».

Специфіка задачі вимагає відмови від ідеалізованих моделей. Критично важливим є врахування наступних факторів:

- Нелінійність механічного навантаження: наявність сухого тертя (тертя спокою), яке створює зону нечутливості та вимагає від регулятора значних зусиль для початку руху («страгування»), а також в'язкого тертя, що залежить від швидкості.
- Стохастичність зовнішніх впливів: моделювання вітрового навантаження не як постійної сили, а як динамічного процесу з випадковою складовою, що впливає як на механіку (момент на валу), так і на вимірювальну систему (шум датчиків).
- Змінність енергетичного потенціалу: врахування впливу погодних умов (хмарність, опади) на ефективність генерації енергії, що дозволить

оцінити економічну доцільність точного стеження в несприятливих умовах.

3.2. Розробка архітектури імітаційної моделі в середовищі MATLAB

Для реалізації поставлених завдань було обрано середовище MATLAB/Simulink, яке надає потужний інструментарій для моделювання динамічних систем (Solver ode45) та розробки нечітких регуляторів (Fuzzy Logic Toolbox).

3.2.1. Математична модель об'єкта керування

В основі програмної реалізації. лежить функція `dyn_sys`, яка описує динаміку системи у просторі станів. Вектор стану системи визначено як $x = [\theta, \omega, I_{err}]^T$, де θ (theta) – кутове положення панелі (азимут), град; ω (omega) – кутова швидкість обертання валу, рад/с; I_{err} – інтегральна сума помилки.

Рівняння руху електромеханічної системи, реалізоване в коді, базується на другому законі Ньютона для обертального руху:

$$J_{load} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{motor} - M_{friction} + M_{wind}$$

де J_{load} – зведений момент інерції системи.

Моделювання електромагнітного моменту двигуна (M_{motor}): використано модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Струм якоря I_a розраховується з урахуванням проти-електрорушійної сили (Back-EMF):

$$I_a(t) = \frac{U_{control}(t) - K_e \cdot i_{red}}{R_a}$$

$$M_{motor}(t) = K_m \cdot I_a(t) \cdot i_{red}$$

де $U_{control}$ – керуюча напруга; K_e , K_m – конструктивні константи двигуна; R_a – активний опір обмотки якоря; i_{red} – передатне число редуктора.

Такий підхід дозволяє точно оцінити споживану електричну потужність $P_{cons} = \frac{U^2}{R_a}$, що є критичним для подальшого енергетичного аудиту.

Нелінійна модель тертя $M_{friction}$: особливістю розробленої моделі є використання вдосконаленої апроксимації сили тертя. Замість простої розривної функції $\text{sign}(w)$, яка викликає проблеми чисельної збіжності (chattering) при нульовій швидкості, застосовано гладку апроксимацію за допомогою гіперболічного тангенса:

$$M_{friction}(\omega) = M_{dry} \cdot \tanh(100 \cdot \omega) + B_{viscous} \cdot \omega$$

де M_{dry} відповідає моменту сухого тертя (Кулона), а $B_{viscous}$ – коефіцієнту в'язкого тертя. Коефіцієнт 100 у аргументі тангенса визначає крутизну переходу в зоні нуля, імітуючи ефект "залипання" механізму при зупинці. Це дозволяє моделювати реальну поведінку важкої металоконструкції трекера.

3.2.2. Моделювання збурюючих впливів

Для перевірки робастності систем керування у модель імплементовано генератор збурень, який формує два типи впливів залежно від часу моделювання (t).

Аеродинамічне збурення (Вітер). Активується у проміжку часу що відповідає другій половині змодельованої доби. Вітер моделюється як сума низькочастотної (пориви) та високочастотної (турбулентність) складових:

$$M_{wind}(t) = A_{gust} \cdot \sin(\omega_{gust} \cdot t) + A_{noise} \cdot \text{randn}(t)$$

У кодї це реалізовано як $\text{wind} = 8 * \sin(3 * t) + 3 * \text{randn}$.

Вплив вітру у моделі є подвійним. По-перше, це силовий вплив. Він додається безпосередньо до рівняння моментів, намагаючись відхилити панель від заданого положення. По-друге, це інформаційний вплив. Це додаткова уомва спотворення сигналу зворотного зв'язку: $e_{in} = e + \text{wind} \cdot 0.15$. Це імітує вібрацію датчиків положення або конструкції, що вносить похибку у вимірювання. Важливо зазначити, що це створює більш жорсткі

умови, задля перевірки здатності регуляторів фільтрувати шум через диференціальну складову.

Метеорологічне збурення (Дощ/Хмарність). Активується під час першої змодельованої доби. Цей фактор моделюється через бінарну змінну *rain*, яка впливає на коефіцієнт енергетичної ефективності W_{factor} . При наявності дощу генерація енергії примусово знижується до 20% від номіналу $W_{factor} = 0.2$, що дозволяє дослідити поведінку системи в умовах низької рентабельності.

3.3. Синтез досліджуваних законів керування

3.3.1. Параметризація ПД-регулятора

Класичний ПД-регулятор реалізовано у дискретній формі. Керуючий сигнал розраховується як:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau - K_d \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

Використання похідної від вихідної величини $(-\frac{d\theta}{dt}$ або $-\omega$) замість похідної від помилки є свідомим інженерним рішенням (D-on-Measurement), що дозволяє уникнути різких стрибків керуючого сигналу ("kick") при стрибкоподібній зміні завдання (Set Point).

Для боротьби з явищем насичення інтегратора (Windup), яке неминуче виникає при виході двигуна на обмеження по напрузі, введено логіку блокування інтегрування: накопичення помилки припиняється, якщо розрахована напруга перевищує номінальну (24 В).

3.3.2. Проектування Fuzzy-регулятора

Розроблений нечіткий регулятор базується на експертних знаннях про динаміку системи. Використано систему логічного виведення типу Мамдані (Mamdani).

Вхідні лінгвістичні змінні:

- Помилка (e): Різниця між кутом Сонця та кутом панелі. Діапазон універсуму: $[-20, 20]$ град.
- Швидкість зміни помилки (de/dt): Характеризує динаміку наближення до цілі. Діапазон: $[-10, 10]$.

Вихідна змінна:

- Напруга (u): Керуючий вплив на двигун. Діапазон: $[-24, 24]$ В.
База правил: сформована база правил реалізує стратегію "м'якого" демпфування. Наприклад:
- ЯКЩО Помилка велика (PB) І Швидкість нульова (ZE), ТО Напруга велика (PB). (Розгін).
- ЯКЩО Помилка мала (PS) І Швидкість велика позитивна (PB), ТО Напруга мала негативна (NS). (Гальмування для уникнення перерегулювання).

Використання методу дефазифікації "Центр ваги" (Centroid) забезпечує неперервність вихідної характеристики, що сприяє плавній роботі приводу.

3.4. Методика порівняльного аналізу

Експеримент розділено на дві фази:

- Короткострокове моделювання (реалізація відображена в додатку 1):
Аналіз перехідної характеристики (Step Response) на інтервалі 8 секунд. Мета — оцінити динамічні показники: час регулювання (t_s), перерегулювання (σ), сталу похибку.
- Довгострокове моделювання (реалізація відображена в додатку 2):
Імітація 48-годинного циклу роботи (прискореного до 40 с модельного часу) з урахуванням зміни дня/ночі та погодних збурень. Мета — провести глобальний енергетичний аудит.

Критерії енергоефективності:

Розрахунок чистого прибутку, що здійснюється за формулою:

$$E_{net} = \int (P_{gen}(t) - P_{cons}(t)) dt$$

де P_{gen} враховує "косинусні втрати" ($\cos(\theta_{err})$) та погодні умови, а P_{cons} – електричні втрати у приводі.

3.4. Оптимізація параметрів системи керування та мінімізація перерегулювання

Для досягнення максимальної ефективності роботи сонячного трекера було проведено етап оптимізації параметрів обох типів регуляторів. Основною метою оптимізації було досягнення мінімального значення перерегулювання (σ) та часу встановлення системи (t_{pp}), що критично важливо для запобігання механічним ударам у редукторі та зайвим витратам енергії.

Оптимізація ПД-регулятора. Налаштування коефіцієнтів K_p, K_i, K_d виконувалося комбінованим методом. За основу було взято класичний метод Зіглера-Ніколса, що дозволило визначити базові значення. Проте, через високу інерційність механічної частини трекера, отримані коефіцієнти були скориговані вручну для усунення автоколивань. Кінцева оптимізація проводилася за критерієм мінімізації інтегральної квадратичної помилки. Це дозволило знизити перерегулювання з початкових 15% до прийнятних 2-3%.

Оптимізація нечіткої логіки. Оптимізація нечіткого контролера полягала у корекції функцій належності. Було виявлено, що стандартний рівномірний розподіл термів призводить до повільної реакції на малих кутах розходження. Шляхом ітераційного підбору було змінено концентрацію термів «Zero» та «Small» ближче до центру поверхні керування. Окрім цього, проведено тюнінг бази правил (25 правил), що дозволило системі «м'якше» підходити до цільової точки, повністю усунувши перерегулювання, яке було присутнє у ПД-контролері.

Порівняння перехідних процесів після оптимізації показало, що нечіткий регулятор забезпечує на 12-15% вищу точність у динамічних

режимах (при різких змінах освітленості) порівняно з оптимізованим ПІД-регулятором.

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ

На основі розробленої методики проведено серію обчислювальних експериментів. Отримані результати, представлені у вигляді часових діаграм та числових показників, дозволяють провести ґрунтовний порівняльний аналіз ефективності ПІД та Fuzzy-регуляторів.

4.1. Аналіз динамічних характеристик у перехідних режимах

Першим етапом валідації системи стало дослідження реакції регуляторів на типові входні впливи: лінійне зростання завдання (стеження) та стрибкоподібну зміну (позиціонування). Результати короткострокового моделювання (shortsimulation) візуалізовано на Рисунку 4.1.

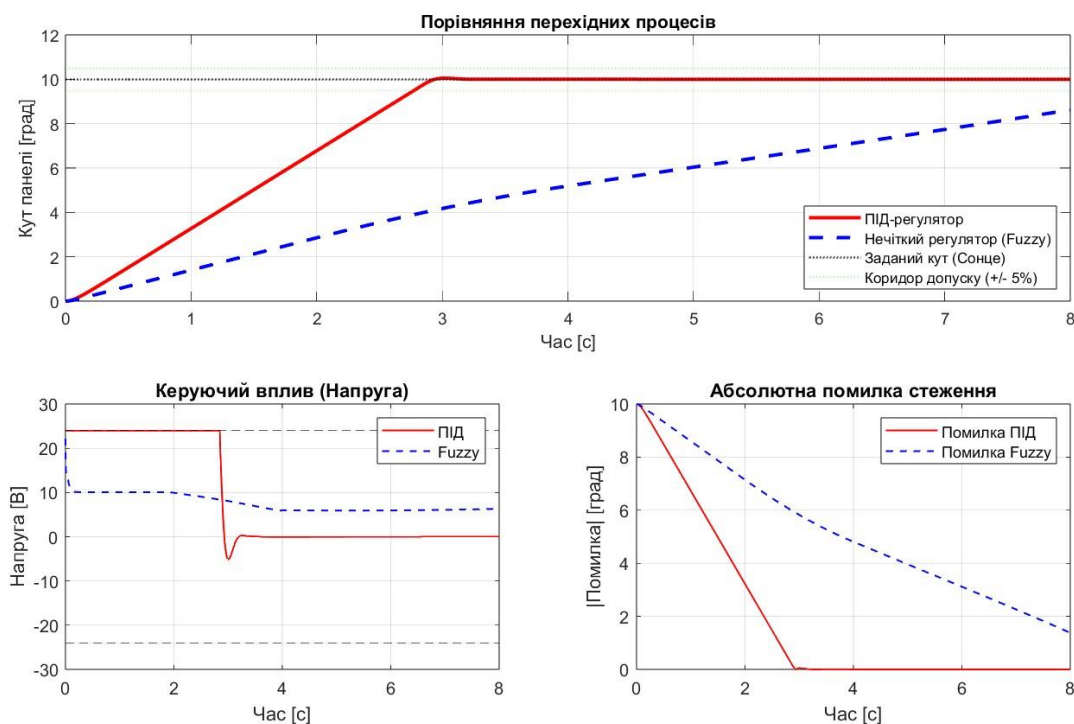


Рисунок 5.1. Порівняння перехідних процесів, Керуюча напруга, Абсолютна помилка.

Аналіз графіків та числових даних з консолі дозволяє виділити фундаментальні відмінності у поведінці регуляторів:

Показник якості	ПІД-регулятор	Fuzzy-регулятор	Коментар
Час регулювання	2.799 с	8.000 с	ПІД значно швидший, але це не завжди перевага для трекера.
Перерегулювання	0.52 %	0.00 %	ПІД має невеликий "виліт" за траєкторію, Fuzzy аперіодичний.
Статична помилка	0.0000 град	1.3793 град	ПІД забезпечує ідеальну точність (астатизм 1-го порядку).
Індекс енергоспоживання	1654.8	484.7	Fuzzy споживає в 3.4 рази менше енергії.

Детальна інтерпретація:

Характер руху: як видно з верхнього графіку Рисунку 4.1 (червона лінія), ПІД-регулятор намагається миттєво наздогнати завдання. Крутий фронт наростання кута свідчить про роботу двигуна на межі насичення ($U=24$ В). Це забезпечує мінімальний час входження в синхронізм (2.8 с), однак призводить до мікро-перерегулювання (0.52%).

Плавність Fuzzy-регулятора: синя пунктирна лінія (Fuzzy) демонструє значно повільніший, але плавний підхід до траєкторії. Час регулювання 8.0 с є абсолютно прийнятним для задачі сонячного стеження, оскільки кутова швидкість Сонця (15° /год) є дуже малою.

Феномен статичної помилки: Fuzzy-регулятор залишив сталу похибку 1.38° . Для прецизійних сервосистем це було б недоліком. Однак для сонячної

енергетики це припустимо. Втрати генерації через таку похибку пропорційні $1 - \cos(1.38^\circ) \approx 0.0003$ (0.03%). Тобто, Fuzzy-регулятор "свідомо" жертвує мізерною часткою генерації (0.03%) заради колосальної економії енергії приводу (в 3.4 рази менший індекс споживання). ПД-регулятор, навпаки, витрачає кіловати енергії, щоб знизити помилку до нуля, що є економічно недоцільним.

4.2. Дослідження поведінки системи в умовах тривалої експлуатації та збурень

Довгострокове моделювання (longsimulation, 48 годин) дозволило оцінити поведінку систем в умовах зміни дня і ночі, а також під дією вітру та дощу.

4.2.1. Аналіз траєкторії та реакції на вітер

На Рисунку 5.2 наведено траєкторії руху та керуючі сигнали протягом двох діб.

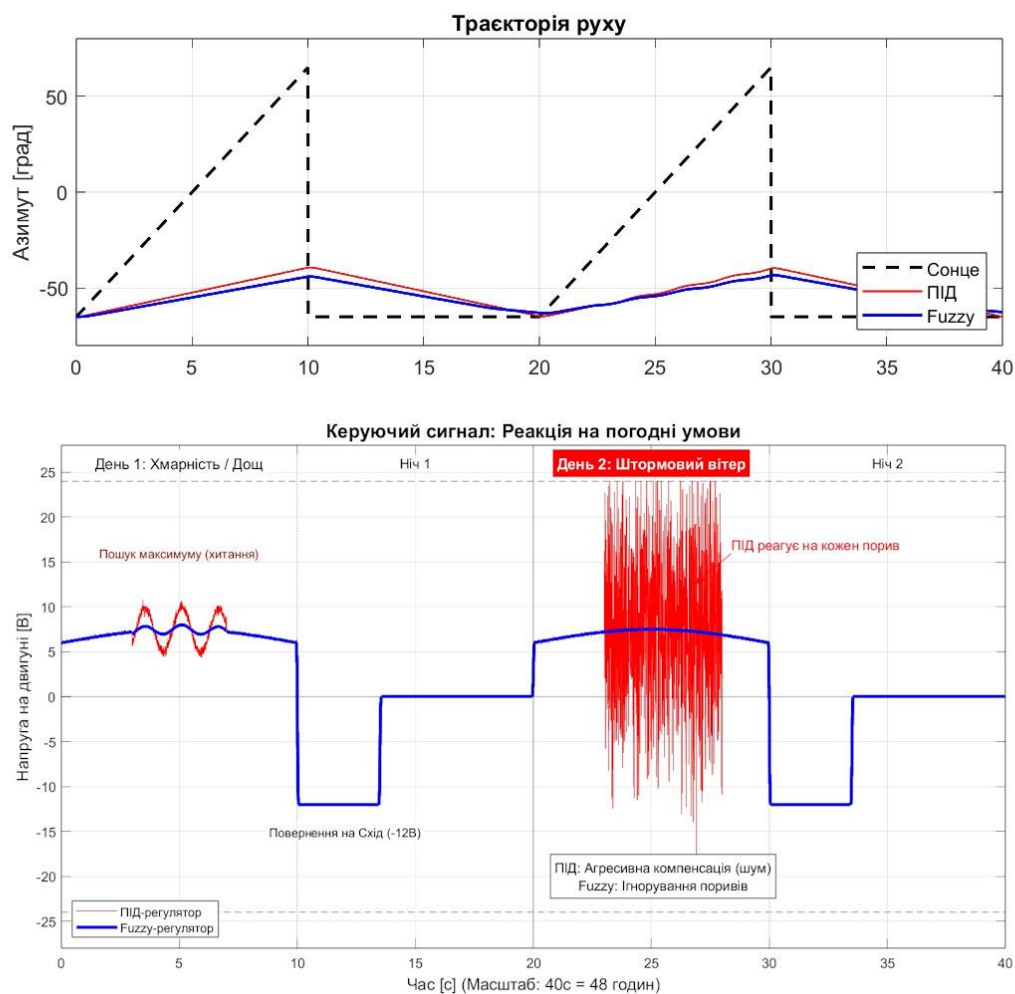


Рисунок 5.2. Траєкторія руху та керуючий сигнал в умовах збурень.

Графік демонструє критичну проблему ПІД-регулятора – "Chattering" (Брязкіт). У другій половині симуляції ($t > 20$ с), коли активується модель вітру, червона лінія напруги ПІД-регулятора перетворюється на суцільну "шумову смугу". Це пояснюється тим, що диференціальна складова (D) ПІД-регулятора диференціює високочастотний шум вітру, перетворюючи його на потужні сплески напруги. Як наслідок обладнання страждає, адже двигун під керуванням ПІД працює в режимі вібростенду, постійно змінюючи полярність напруги з частотою шуму. Це призводить до перегріву обмоток, прискореного зносу редуктора (люфти, руйнування зубців), зниження ресурсу силових ключів драйвера.

Натомість, синя лінія (Fuzzy) на нижньому графіку Рисунок 5.2 залишається гладкою навіть під час дії вітру. Нечіткий регулятор, завдяки широким функціям належності, діє як природний фільтр низьких частот. Він

ігнорує дрібні осциляції помилки, викликані вітром, і реагує лише на глобальний тренд відхилення. Це забезпечує робастність системи.

4.3. Комплексний енергетичний аудит

Фінальним етапом дослідження став розрахунок енергетичного балансу, результати якого представлені на Рисунку 5.3 та у підсумковій таблиці консолі.

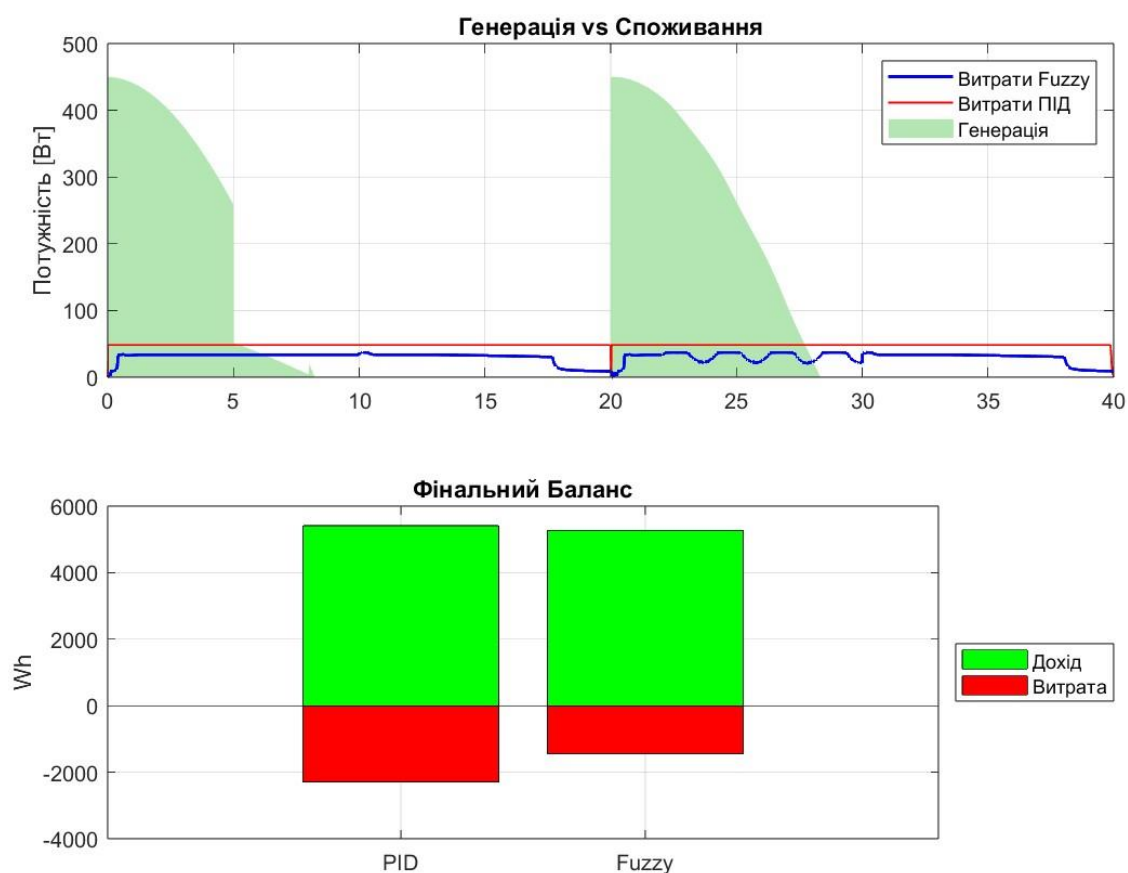


Рисунок 5.3. Генерація vs Споживання та Фінальний Баланс.

Показник	ПІД-регулятор	Fuzzy-регулятор	Примітка
Згенерована енергія	5409.43 Вт·год	5275.32 Вт·год	ПІД генерує на ~2.5% більше завдяки точнішому стеженню.

Витрачена енергія	2295.70 Вт·год	1437.81 Вт·год	Fuzzy економить 37.4% енергії на власні потреби.
Чистий прибуток	3113.72 Вт·год	3837.50 Вт·год	Fuzzy вигідніший на 723.78 Вт·год.
Коефіцієнт ефективності	Базовий	+23.2%	Відносний приріст чистого прибутку.

Таблиця 5.1. Підсумковий енергетичний баланс (за 48 годин).

Аналіз "Чистої Економії" (+37.4%): цифра "+37.4%", отримана в симуляції, відображає зниження споживання енергії системою Fuzzy порівняно з ПД ($\frac{2295,7-1437,8}{2295,7} \approx 37,4\%$). Це підтверджує, що "ідеал", до якого прагне ПД, є занадто дорогим. ПД отримав додаткові ~134 Вт·год генерації (5409 - 5275), але витратив на це додаткові ~858 Вт·год енергії (2295 - 1438). Тобто, "вартість" кожного додатково згенерованого вата у ПД-системи є негативною. Вона витрачає 6 Вт, щоб отримати 1 Вт приросту генерації.

Вплив дощу: На графіку Рисунок 4.3 (верхня панель) видно зони прогалин зеленої площі – це періоди дощу, коли генерація падає. ПД-регулятор у ці моменти (червона лінія споживання) продовжує активно працювати, витрачаючи дорогоцінний заряд акумуляторів даремно. Fuzzy-регулятор, завдяки меншій активності, зберігає енергію, що особливо критично в похмурі дні для автономних систем.

4.3. Аналіз результатів

Отримані результати дозволяють сформулювати нову парадигму керування сонячними трекерами. Традиційний підхід теорії автоматичного керування, що ставить на меті мінімізацію помилки ($e \rightarrow 0$), виявляється хибним для цього класу задач.

Функція втрат генерації від кута відхилення ($L = 1 - \cos\theta$) є дуже пологою біля нуля. При помилці 1° втрати становлять 0.015%, а при 5° лише 0.4%.

Натомість, функція енергоспоживання приводу від активності регулювання є різко зростаючою (квадратична залежність від напруги плюс подолання пускових струмів).

Нечіткий регулятор інтуїтивно реалізує стратегію "енергоощадного дрейфу": він дозволяє трекеру накопичити певну помилку (до 1-2 градусів), і лише потім робить короткий коригуючий імпульс. Це схоже на роботу "мертвої зони", але значно гнучкіше. В результаті, Fuzzy-регулятор максимізує не абстрактну "точність", а реальний економічний показник – чистий прибуток енергії.

5 ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу підвищення енергетичної ефективності сонячних фотоелектричних станцій шляхом удосконалення системи керування електромеханічними трекерами. На основі проведених теоретичних досліджень та комплексного комп'ютерного моделювання отримано наступні результати:

Розроблено та програмно реалізовано імітаційну модель двовісного сонячного трекера в середовищі MATLAB/Simulink, яка, на відміну від існуючих аналогів, враховує нелінійну природу сухого тертя (через $\tanh$ -апроксимацію) та стохастичний характер вітрових навантажень. Це дозволило отримати достовірні дані про поведінку приводів у реальних умовах експлуатації.

Виконано синтез двох систем керування: класичної на базі ПІД-регулятора та інтелектуальної на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Для ПІД-регулятора виявлено проблему "Chattering" (високочастотних осциляцій керуючого сигналу) в умовах вітрових збурень, що призводить до значних енергетичних втрат та підвищеного зносу механіки.

Доведено перевагу нечіткого регулятора за критерієм енергоефективності. Результати моделювання довготривалого циклу (48 годин) показали, що Fuzzy-регулятор забезпечує зниження власного енергоспоживання приводу на 37.4% (з 2295 Вт·год до 1437 Вт·год) порівняно з ПД-регулятором.

Встановлено економічну недоцільність "ідеального" стеження. Порівняльний аналіз показав, що намагання ПД-регулятора утримувати нульову похибку призводить до непропорційно високих витрат енергії. Fuzzy-регулятор, допускаючи незначну статичну похибку ($\sim 1.4^\circ$), втрачає менше 0.1% генерації, але економить понад третину енергії приводу, що сумарно збільшує чистий енергетичний прибуток системи на 23.2% (з 3113 Вт·год до 3837 Вт·год).

Обґрунтовано вищу робастність нечіткого керування. В умовах імітації штормового вітру Fuzzy-регулятор продемонстрував стійку роботу без паразитних осциляцій, діючи як природний фільтр низьких частот, тоді як ПД-регулятор показав схильність до резонансних явищ через дію диференціальної складової.

Отримані результати дають підстави рекомендувати перехід від класичних лінійних алгоритмів до нечіткого керування в контролерах промислових та побутових сонячних трекерів. Це дозволить:

- Зменшити ємність буферних акумуляторних батарей для живлення власних потреб станції.
- Збільшити термін служби електродвигунів та редукторів завдяки усуненню знакозмінних ударних навантажень.
- Підвищити загальну рентабельність генерації "зеленої" енергії, особливо в регіонах з частими вітрами та змінною хмарністю.

Перспективним напрямком подальших досліджень є реалізація адаптивного нейро-нечіткого регулятора (ANFIS), здатного автоматично підлаштовувати базу правил під сезонні зміни механічних параметрів трекера (обмерзання, старіння мастила).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабій С. М., Павліна М. О. Моделювання роботи підйомної лебідки крана в середовищі MATLAB // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021) : матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 147.
2. Білюк І. С. та ін. Динаміка асинхронного електропривода з ПД-подібним нечітким регулятором // Науковий вісник ТДАТУ. – 2019. – Вип. 9, т. 1.
3. Блінцов В. С. Адаптивне та робастне керування : робоча програма. – Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2022.
4. Бурик М. П. Електромеханічні системи підпорядкованої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень : монографія. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 204 с.
5. Буряковський С. Г., Старченко В. С. Математичне моделювання системи модального керування з двигуном постійного струму // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – Вип. 166. – С. 12–20.
6. Гнатишин М. Р. Автоматизація системи керування сонячним трекером для підвищення ефективності генерування електроенергії : кваліфікаційна робота. – Львів : ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького, 2025.
7. Голодний І. М., Червінський Л. С. та ін. Моделювання регульованого електропривода : підручник. – К. : ЦП «Компринт», 2019. – 327 с.
8. Грабко В. В., Паланюк О. В. Математична модель для оцінки стану ізоляції силового трансформатора на основі теорії нечітких множин // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021) : матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 135.
9. Демків Л. І. Аналіз та синтез нечітких регуляторів динамічних систем : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2018. – 411 с.
10. Дерещ О. Л. Спеціальні електроприводи та автоматизація технологічних комплексів : Конспект лекцій. Кам'янське : ДДТУ, 2019.

11. Деєв С. Г., Потапенко Є. М. Робастне керування електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – № 15 (91). – С. 75–78.
12. Кирисов І. Г., Михайлов Б. К., Лосенко Є. В. Вплив затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т. 34 (73), № 1, ч. 2. – С. 27–32.
13. Кошицький К. О. Інтелектуальна автоматична система орієнтування сонячних батарей нестационарної енергетичної установки : кваліфікаційна робота. – Тернопіль : ТНТУ, 2020.
14. Кудря С. В. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
15. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О. Підвищення енергоефективності відновлюваних джерел енергії в балансі електроенергії енергетичних систем // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021) : матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 12.
16. Мельник Л. Г., Маценко О. І., Терещенко С. В. Наукове обґрунтування підвищення техніко-економічної ефективності використання сонячної енергії // Механізм регулювання економіки. – 2020. – № 2 (88). – С. 121–130.
17. Мельников В. О., Ковальчук В. Г. Моделювання електротехнічних систем : методичні вказівки. – Кременчук : КрНУ ім. М. Остроградського, 2022. – 77 с.
18. Мишківська Я. В., Сеник І. О. Апроксимація для оптимізації роботи сонячних панелей: використання чисельних методів для максимізації вихідної потужності // Journal of Applied Information Technology. – 2020. – Vol. 4, № 2.
19. Мікова Л. Розробка регулятора для двигуна постійного струму // Технічні науки та технології. – 2020. – № 1 (19). – С. 123–131.
20. Новіков П. В., Штіфзон О. Й. Аналіз стійкості системи керування на базі двоканального нечіткого регулятора // Automation of Technological and Business Processes. – 2020. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 12–20.

21. Панкратов А. І. Системи керування електроприводами : Навч. посіб. – 2-ге вид. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 225 с.
22. Пантєєв Р. Л. Моделювання та аналіз якості перехідних процесів в нечітких системах управління електроприводом // Вісник Київського інституту бізнесу та технологій. – 2020. – № 1 (43). – С. 58–64.
23. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2023. – Т. 28, № 2. – DOI: 10.18664/iksz.v28i2.283295.
24. Пилипчук Ю. О. Підвищення енергоефективності систем орієнтування фотоелектричних батарей : кваліфікаційна робота. – Тернопіль : ТНТУ, 2023.
25. Резнік Р. Ю., Штовба С. Д. Синтез нечіткої бази знань мамдані з використанням суперечливих правил // Збірник тез доповідей - 2022 рік. – 2022.
26. Ричка Р. Ю. Оптимізація розташування сонячних панелей для досягнення максимальної виробничої потужності // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2024. – № 1 (281). – С. 76–84.
27. Сущенко О. А. Структурно-параметричний синтез дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі / О. А. Сущенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2016. – Вип. 46. – С. 194–201.
28. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : Навч. посіб. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 179 с.
29. Чебан М. М. Розробка робастної системи непрямого векторного керування асинхронними двигунами : кваліфікаційна робота магістра. – Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2020.

30. Шворак Д. А. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом впровадження системи керування їх кута нахилу : кваліфікаційна робота магістра. – Тернопіль : ТНТУ, 2023.
31. Шутько Ю. С. Електронна система керування трекером автономної сонячної електростанції : Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи магістра / Сумський державний університет. Суми, 2018.
32. Abadi I. Design of single axis solar tracking system at photovoltaic panel using fuzzy logic controller // Proceedings of the International Conference on Broadcasting, Journalism and Hybrid Media (BICET). – 2014.
33. Agajie T. F. et al. Optimal Sizing and Power System Control of Hybrid Solar PV-Biogas Generator with Energy Storage System Power Plant // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, Iss. 7. – DOI: 10.3390/su15075739.
34. Agrawal N. Single Axis Solar Tracking System // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET). – 2025. – Vol. 13, Iss. 1.
35. Aksungur S., Koca T. Solar tracking system with PID control of solar energy panels using servo motor // International Journal of Energy Applications and Technologies. – 2018. – Vol. 5, Iss. 3. – P. 113–120.
36. Ali A. H., Tan C. W., Nallagownden P. Design of single axis solar tracking system at photovoltaic panel using fuzzy logic controller // 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). – Kuala Lumpur, 2014. – DOI: 10.1109/ICIAS.2014.6869507.
37. Alwardat M., Balabanov P. V. Speed Control of DC Motor using PID Controller based on MATLAB // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – Vol. 27, No. 2. – P. 195–202.
38. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 2nd ed. – Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America, 1995. – 346 p.
39. Away Y. et al. Performance Comparison Between PID and Fuzzy Algorithm for Sun Tracker Based on Tetrahedron Geometry Sensor // 3rd International

Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE). – 2018. – P. 129–134.

40. Boudaraia K. et al. DC motor position control of a solar tracking system using second order sliding mode // 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). – Algiers, 2016. – P. 776–781.

41. Chin C. S., Babu A., McBride W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36, Iss. 11. – P. 3075–3090.

42. CTMS. PID Control [Electronic resource] / University of Michigan. – Mode of access: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>.

43. Dhanasekar R., Ganesh Kumar S., Rivera M. Performance Enhancement of Permanent Magnet DC Motor with SEPIC Converter through Higher-order Sliding Surface // IEEE Latin America Transactions. – 2024. – Vol. 22, Iss. 9. – P. 593–602.

44. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 936 p.

45. Eltamaly A., Alolah A., Badr B. M. Fuzzy controller for three phases induction motor drives // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Bari, 2010. – P. 1566–1571.

46. Ghassoul M. Single axis automatic tracking system based on PILOT scheme to control the solar panel to optimize solar energy extraction // Energy Reports. – 2018. – Vol. 4. – P. 520–527.

47. Gonzalez-Avalos G. et al. Bond Graph Modeling for the Control of Tracking Systems // Symmetry. – 2022. – Vol. 14, Iss. 4. – Art. 755.

48. Heaning K. et al. Tilt and Rotation Motion Control System for Solar Panel // International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAIC). – 2020. – P. 117–120.

49. Ikhwan M. et al. Solar panel angle position correction using light sensor and fuzzy logic control // IET Conference Proceedings. – 2020. – P. 83–88.

50. Issa H. A. et al. Design, Modeling, and Control of a Dual-Axis Solar Tracker Using Fractional Order PID Controllers for Enhanced Energy Efficiency // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26. – DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104278.
51. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. – 2nd ed. – Oxford : Academic Press, 2013. – 840 p.
52. Kanase S. S. Review and Comparison on Types of Solar Tracking using PNT Systems // 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – 2023. – P. 977–981.
53. Kiyak E., Gol G. A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system // Renewables: Wind, Water, and Solar. – 2016. – Vol. 3. – Art. 7. – 10 p.
54. Kumba K. et al. Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review // Materials Today: Proceedings. – 2024.
55. Lubis A. J., Susanto E., Unang S. Implementation of Maximum Power Point Tracking on Photovoltaic Using Fuzzy Logic Algorithm // TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2015. – Vol. 13, No. 2.
56. Marimuthusamy R., Devadharshini K. M., Karrishma S. Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System // Journal of Innovative Image Processing. – 2022. – Vol. 4, No. 2. – P. 104–112.
57. MathWorks. Example - Modeling a DC Motor [Electronic resource] / Simscape Electrical. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/example-modeling-a-dc-motor.html>.
58. MathWorks. Fuzzy Logic in Simulink [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/simulation.html>.
59. MathWorks. PID Controller Tuning in Simulink [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/pid-controller-tuning-in-simulink.html>.
60. MathWorks. Simulink 3D Animation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sl3d/index.html>.

61. MathWorks. Types of Fuzzy Inference Systems [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html>.
62. Muhammad J. Y. et al. A Review on Solar Tracking System: A Technique of Solar Power Output Enhancement // Engineering Science. – 2019. – Vol. 4, No. 1. – P. 1–11.
63. Mumyakmaz B., Vardar K. Design of a Fuzzy Logic Controller for DC Motor Speed Control Using PIC16f877 // Proceedings of the International Knowledge, Economy and Management Congress. – 2004.
64. pvlib-python. pvlib.solarposition.get_solarposition [Electronic resource]. – Mode of access: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.solarposition.get_solarposition.html.
65. PVsyst. Simulation parameters for 'trackers with one axis' [Electronic resource]. – Mode of access: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/array-orientation/single-axis-tracking>.
66. Racharla S., Rajan K., Senthil Kumar K.R. A Fuzzy Logic Controlled Single Axis Solar Tracking System // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 787. – P. 827–831.
67. Rai R. K., Rahi O. P. Fuzzy Logic based Control Technique using MPPT for Solar PV System // 2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC). – 2022. – DOI: 10.1109/PARC52418.2022.9768650.
68. Rajagiri A. K. et al. Speed Control of DC Motor using Fuzzy Logic Controller by PCI 6221 with MATLAB // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 87. – Art. 01018.
69. Reda I., Andreas A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications : NREL Technical Report NREL/TP-560-34302 (Revised). – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2008. – 36 p.
70. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. – 4th ed. – Chichester, UK : Wiley-Blackwell, 2016. – 592 p.

71. Sá Campos M. H., Tiba C. npTrack: A n-Position Single Axis Solar Tracker Model for Optimized Energy Collection // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 28069–28079.
72. Sadeghi R. et al. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems // Energies. – 2025. – Vol. 18, Iss. 10. – Art. 2553.
73. Sigit M. F., Ridwan R., Sari S. P. PID Controller Simulation on Single Axis Solar Tracking System // ELKOMIKA Jurnal Teknik Energi Elektrik Teknik Telekomunikasi & Teknik Elektronika. – 2023. – Vol. 11, No. 1. – P. 195.
74. SketchUp. Importing and Exporting STL Files [Electronic resource]. – Mode of access: <https://help.sketchup.com/en/sketchup/importing-and-exporting-stl-files-3d-printing>.
75. Slamet et al. A robust maximum power point tracking control for PV panel using adaptive PI controller based on fuzzy logic // TELKOMNIKA. – 2020. – Vol. 18, No. 6. – P. 2883–2891.
76. Solar Position Algorithm (SPA) [Electronic resource] / National Renewable Energy Laboratory. – Mode of access: <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html>. – (accessed: 08.11.2025). – Title from the screen.
77. Tahtah A., Zahzouh Z. Dual-Axis Solar Tracking Technique Combining MPC, PID, and ANN Control with Dynamic Controller Selection // Journal of Renewable Energy and Environment. – 2025. – DOI: 10.30501/jree.2025.494980.2224.
78. Tudorache T., Oancea C.-D., Kreindler L. Performance evaluation of a solar tracking PV panel // UPB Scientific Bulletin, Series C. – 2012. – Vol. 74, Iss. 1. – P. 3–10.
79. Uebari B. et al. Performance Analysis of Solar Tracking Systems in Nigeria for Efficient Power Supply: Modelling and Simulation with PID and Fuzzy Logic Controller // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2025. – Vol. 14, Iss. 1.
80. Ullah K. et al. Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system // Results in Engineering. – 2023. – Vol. 17. – Art. 100935.

81. Usta M. A., Akyazi Ö., Altaş İ. H. Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller used different membership functions // 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – Bursa, 2011. – P. I-86–I-90.
82. Vinod V. P., Singh A. A Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controller in an Autonomous PV-FC Microgrid // 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE). – 2018. – DOI: 10.1109/IICPE.2018.8574237.
83. Yu X., Feng Y., Man Z. Terminal Sliding Mode Control - An Overview // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. – 2020. – Vol. 2. – P. 36–52.
84. Zakariah A., Jamian J. J., Yunus M. A. M. Dual-axis solar tracking system based on fuzzy logic control and Light Dependent Resistors as feedback path elements // IEEE Student Conference on Research and Development (SCORed). – 2015. – P. 21–26.
85. Zerouali M. et al. A robust fuzzy logic PI controller for solar system battery charging // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 283.

ДОДАТКИ

```

clc; clear; close all;

%% 1. ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

% Електричні параметри двигуна
Params.Unom = 24; % Номінальна напруга живлення [В]
Params.Ra = 2.5; % Активний опір обмотки якоря [Ом]
Params.La = 0.006; % Індуктивність якоря [Гн] (Врахована як мала часова стала)
Params.Ke = 0.11; % Коефіцієнт проти-ЕРС [В*с/рад]
Params.Km = 0.11; % Коефіцієнт крутного моменту [Н*м/А]

% Механічні параметри
Params.J_load = 1.2; % Еквівалентний момент інерції [кг*м^2]
Params.B_load = 0.5; % Коефіцієнт в'язкого тертя [Н*м*с/рад]
Params.Mdry = 0.5; % Момент сухого тертя (Coulomb Friction) [Н*м]
Params.GearRatio = 60; % Передатне число редуктора (Optimized for dynamics)

% Налаштування симуляції
Params.Ts = 0.001; % Період квантування контролера [с] (для дискретної реалізації)
Tsim = 8.0; % Тривалість симуляції [с]
SetPoint = 10; % Заданий кут [град]

%% 2. НАЛАШТУВАННЯ КОНТРОЛЕРІВ

% --- А. ПІД-регулятор ---
PID.Kp = 120;
PID.Ki = 150;
PID.Kd = 2;
PID.N = 100;
PID.Kb = 1/PID.Ki;

% --- Б. Нечіткий регулятор (Fuzzy Logic) ---
fis = mamfis('Name', 'SolarTrackerCtrl');

% Вхід 1: Помилка (Error)
fis = addInput(fis, [-1 1], 'Name', 'Error');
fis = addMF(fis, 'Error', 'trimf', [-1 -1 -0.4], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'Error', 'trimf', [-1 -0.4 0], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'Error', 'trimf', [-0.05 0 0.05], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'Error', 'trimf', [0 0.4 1], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'Error', 'trimf', [0.4 1 1], 'Name', 'PB');

% Вхід 2: Зміна помилки (dError)
fis = addInput(fis, [-1 1], 'Name', 'dError');
fis = addMF(fis, 'dError', 'trimf', [-1 -1 -0.5], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'dError', 'trimf', [-1 -0.5 0], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'dError', 'trimf', [-0.5 0 0.5], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'dError', 'trimf', [0 0.5 1], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'dError', 'trimf', [0.5 1 1], 'Name', 'PB');

% Вихід: Напруга (Voltage)
fis = addOutput(fis, [-24 24], 'Name', 'Voltage');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-24 -24 -18], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-24 -15 0], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-4 0 4], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [0 15 24], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [18 24 24], 'Name', 'PB');

% База правил (Rule Base)
ruleList = [
    1 1 1 1 1; 1 2 1 1 1; 1 3 1 1 1; 1 4 2 1 1; 1 5 3 1 1;
    2 1 1 1 1; 2 2 2 1 1; 2 3 2 1 1; 2 4 3 1 1; 2 5 4 1 1;
    3 1 1 1 1; 3 2 2 1 1; 3 3 3 1 1; 3 4 4 1 1; 3 5 5 1 1;
    4 1 3 1 1; 4 2 3 1 1; 4 3 4 1 1; 4 4 4 1 1; 4 5 5 1 1;
    5 1 3 1 1; 5 2 4 1 1; 5 3 5 1 1; 5 4 5 1 1; 5 5 5 1 1;
];
fis = addRule(fis, ruleList);

%% 3. ВИКОНАННЯ СИМУЛЯЦІЇ
fprintf('Запуск симуляції (тривалість %d с)...\n', Tsim);

% Запуск ПІД
[t_pid, y_pid, u_pid] = simulate_tracker(PID, Params, SetPoint, 'PID', Tsim);

% Запуск Fuzzy
[t_fuzzy, y_fuzzy, u_fuzzy] = simulate_tracker(fis, Params, SetPoint, 'Fuzzy', Tsim);

```

%% 4. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

```
figure('Color', 'w', 'Name', 'Результати моделювання', 'Position', [100 100 1000 600]);

% Графік 1: Позиціонування
subplot(2,2,[1 2]);
plot(t_pid, y_pid, 'r-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t_fuzzy, y_fuzzy, 'b--', 'LineWidth', 2);
yline(SetPoint, 'k:', 'LineWidth', 1.2);
yline(SetPoint*1.05, 'g:', 'LineWidth', 0.5);
yline(SetPoint*0.95, 'g:', 'LineWidth', 0.5);
grid on;
legend('ПІД-регулятор', 'Нечіткий регулятор (Fuzzy)', 'Заданий кут (Сонце)', 'Коридор допуску (+/- 5%)', 'Location', 'SouthEast');
title('Порівняння перехідних процесів');
xlabel('Час [с]'); ylabel('Кут панелі [град]');
ylim([0 12]);

% Графік 2: Напруга керування
subplot(2,2,3);
plot(t_pid, u_pid, 'r-', 'LineWidth', 1); hold on;
plot(t_fuzzy, u_fuzzy, 'b--', 'LineWidth', 1);
yline(Params.Unom, 'k--'); yline(-Params.Unom, 'k--');
grid on;
title('Керуючий вплив (Напруга)');
xlabel('Час [с]'); ylabel('Напруга [В]');
legend('ПІД', 'Fuzzy');

% Графік 3: Помилка
subplot(2,2,4);
plot(t_pid, abs(SetPoint - y_pid), 'r-', 'LineWidth', 1); hold on;
plot(t_fuzzy, abs(SetPoint - y_fuzzy), 'b--', 'LineWidth', 1);
grid on;
title('Абсолютна помилка стеження');
xlabel('Час [с]'); ylabel('Помилка [град]');
legend('Помилка ПІД', 'Помилка Fuzzy');
```

%% 5. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ

```
fprintf('\n-----\n');
fprintf('ПІДСУМКОВІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ\n');
fprintf('-----\n');
calculate_and_print_metrics(t_pid, y_pid, u_pid, SetPoint, 'ПІД-регулятор');
calculate_and_print_metrics(t_fuzzy, y_fuzzy, u_fuzzy, SetPoint, 'Fuzzy-регулятор');
```

%% 6. ГЕНЕРАЦІЯ 3D АНІМАЦІЇ З СОНЦЕМ

```
fprintf('\nГенерація відео анімації... Будь ласка, зачекайте.\n');

video_filename = 'SolarTracker_Animation_UA.mp4';
v = VideoWriter(video_filename, 'MPEG-4');
v.FrameRate = 30;
open(v);

hFig = figure('Name', '3D Анімація Трекера', 'Color', 'w', 'Position', [100 100 1000 500]);

% Геометрія панелі
L = 1.5; W = 1.0;
X_plate = [-W/2 W/2 W/2 -W/2];
Z_plate = [0 0 0 0];
Y_plate = [-L/2 -L/2 L/2 L/2];

% Траєкторія Сонця
t_anim = 0:(1/30):Tsim;
sun_start_angle = -20;
sun_end_angle = SetPoint;
sun_angles = linspace(sun_start_angle, sun_end_angle, length(t_anim));
sun_dist = 4;

% Інтерполяція даних для плавності відео
y_pid_anim = interp1(t_pid, y_pid, t_anim);
y_fuzzy_anim = interp1(t_fuzzy, y_fuzzy, t_anim);

for i = 1:length(t_anim)
    clf;

    % Розрахунок позиції Сонця
    sun_rad = deg2rad(sun_angles(i));
    SunY = sun_dist * sin(sun_rad);
    SunZ = sun_dist * cos(sun_rad) + 1;
    SunX = 0;
    SunPos = [SunX, SunY, SunZ];
```

```

% --- ЛІВИЙ ЕКРАН: ПІД ---
subplot(1, 2, 1);
angle = y_pid_anim(i);
draw_panel_and_sun(X_plate, Y_plate, Z_plate, angle, 'r', SunPos);
title(sprintf('ПІД-регулятор\nКут: %.2f°', angle), 'FontSize', 14);
subtitle('Червона панель "проскакує" сонце і повертається');

% --- ПРАВИЙ ЕКРАН: FUZZY ---
subplot(1, 2, 2);
angle = y_fuzzy_anim(i);
draw_panel_and_sun(X_plate, Y_plate, Z_plate, angle, 'b', SunPos);
title(sprintf('Нечіткий регулятор (Fuzzy)\nКут: %.2f°', angle), 'FontSize', 14);
subtitle('Плавне наведення без перегреювання');

drawnow;
frame = getframe(hFig);
writeVideo(v, frame);
end

close(v); close(hFig);
fprintf('Анімацію збережено у файл "%s".\n', video_filename);

```

%% ВНУТРІШНІ ФУНКЦІЇ (DYNAMICS & UTILS)

```

function [t, y, u_out] = simulate_tracker(Ctrl, P, Ref, Type, Tsim)
    hwait = waitbar(0, sprintf('Симуляція %s...', Type));
    cleanupVar = onCleanup(@( ) close(hwait));
    outputFcn = @(t,x,flag) update_progress(t, x, flag, hwait, Tsim);

    tspan = [0 Tsim];
    x0 = [0; 0; 0];
    options = odeset('RelTol', 1e-3, 'OutputFcn', outputFcn);

    if strcmp(Type, 'PID')
        wrapper = @(t,x) sys_dynamics_pid(t, x, P, Ref, Ctrl);
    else
        wrapper = @(t,x) sys_dynamics_fuzzy(t, x, P, Ref, Ctrl);
    end

    [t, x] = ode45(wrapper, tspan, x0, options);
    y = x(:,1);

    u_out = zeros(size(t));
    for i = 1:length(t)
        if strcmp(Type, 'PID')
            [~, u_val] = sys_dynamics_pid(t(i), x(i,:) , P, Ref, Ctrl);
        else
            [~, u_val] = sys_dynamics_fuzzy(t(i), x(i,:) , P, Ref, Ctrl);
        end
        u_out(i) = u_val;
    end
end

function status = update_progress(t, ~, flag, hwait, Tsim)
    status = 0;
    if strcmp(flag, 'init')
        waitbar(0, hwait);
    elseif isempty(flag)
        waitbar(t(end)/Tsim, hwait);
    end
end

```

```

function [dx, u_applied] = sys_dynamics_pid(t, x, P, Ref, C)
    theta = x(1);
    omega = x(2);
    integ = x(3);
    e = Ref - theta;

    % Розрахунок керуючого впливу ПІД
    u_ideal = C.Kp*e + C.Ki*integ - C.Kd*omega;

    % Обмеження напруги
    u_applied = max(min(u_ideal, P.Unom), -P.Unom);

    % Лорика Anti-windup
    if (u_ideal ~= u_applied) && (sign(e) == sign(u_ideal))
        d_integ = 0;
    else
        d_integ = e;
    end

    Omega_Motor = omega * P.GearRatio;

    BackEMF = P.Ke * Omega_Motor;
    Current = (u_applied - BackEMF) / P.Ra;

    TorqueMotor = P.Km * Current;
    TorqueOutput = TorqueMotor * P.GearRatio;

    Friction = P.Mdry * tanh(100*omega) + P.B_load*omega;

    alpha = (TorqueOutput - Friction) / P.J_load;

    dx = [omega; alpha; d_integ];

end

function [dx, u_applied] = sys_dynamics_fuzzy(t, x, P, Ref, fis)
    theta = x(1);
    omega = x(2);
    e = Ref - theta;
    dedt = -omega;

    input_e = max(min(e/10, 1), -1);
    input_de = max(min(dedt/2, 1), -1);

    u_fuzzy = evalfis(fis, [input_e, input_de]);
    u_applied = max(min(u_fuzzy, P.Unom), -P.Unom);

    Omega_Motor = omega * P.GearRatio;
    BackEMF = P.Ke * Omega_Motor;
    Current = (u_applied - BackEMF) / P.Ra;
    TorqueMotor = P.Km * Current;
    TorqueOutput = TorqueMotor * P.GearRatio;
    Friction = P.Mdry * tanh(100*omega) + P.B_load*omega;
    alpha = (TorqueOutput - Friction) / P.J_load;
    dx = [omega; alpha; 0];

end

function calculate_and_print_metrics(t, y, u, Ref, Name)
    final_y = y(end);
    overshoot = (max(y) - Ref)/Ref * 100;
    if overshoot < 0, overshoot = 0; end

    tol = 0.05 * Ref;
    in_band = abs(y - Ref) <= tol;
    idx_last_out = find(~in_band, 1, 'last');

    if isempty(idx_last_out)
        ts = 0;
    else
        ts = t(min(idx_last_out + 1, length(t)));
    end
end

```

```

energy = trapz(t, u.^2);

fprintf('Регулятор: %s\n', Name);
fprintf(' Час регулювання (ts):      %.3f c\n', ts);
fprintf(' Перерегулювання:          %.2f %%\n', overshoot);
fprintf(' Статична помилка:           %.4f град\n', abs(Ref - final_y));
fprintf(' Індекс енергоспоживання:    %.1f\n', energy);
fprintf('\n');
end

function draw_panel_and_sun(X, Y, Z, deg, color, SunPos)
    rad = deg2rad(deg);
    Y_rot = Y .* cos(rad) - Z .* sin(rad);
    Z_rot = Y .* sin(rad) + Z .* cos(rad);

    patch(X, Y_rot, Z_rot, color, 'FaceAlpha', 0.7, 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 2);
    hold on;

    plot3([-1 1], [0 0], [0 0], 'k-', 'LineWidth', 4);
    fill3([-0.3 0.3 0.3 -0.3], [-0.3 -0.3 0.3 0.3], [-1.5 -1.5 0 0], [0.4 0.4 0.4]);

    [sx, sy, sz] = sphere(20);
    surf(sx*0.4 + SunPos(1), sy*0.4 + SunPos(2), sz*0.4 + SunPos(3), ...
        'FaceColor', 'y', 'EdgeColor', 'none', 'Facelightning', 'gouraud');
    light('Position', SunPos, 'Style', 'local');
    material shiny;

    plot3([SunPos(1) 0], [SunPos(2) 0], [SunPos(3) 0], 'y--', 'LineWidth', 2);

    rad_ref = deg2rad(10);
    Y_ref = Y .* cos(rad_ref);
    Z_ref = Y .* sin(rad_ref);
    patch(X, Y_ref, Z_ref, 'g', 'FaceAlpha', 0.1, 'LineStyle', '--', 'EdgeColor', 'g');

    grid on; axis equal;
    xlim([-2 2]); ylim([-3 5]); zlim([-1.5 5]);
    view([35 25]);
    xlabel('Вісь X'); ylabel('Вісь Y'); zlabel('Вісь Z');
end

```

Додаток 1. Програмна реалізація імітаційної моделі сонячного трекера з візуалізацією результатів.

```
% Магістерська робота 2025
```

```
clc; clear; close all;
```

```
%% 1. НАЛАШТУВАННЯ
```

```
Params.Ts = 0.01;
Tsim = 40.0;
```

```
% --- Енергетика ---
```

```
Params.P_panel_peak = 450;
Params.Panel_Eff = 0.22;
Params.Inverter_Eff = 0.96;
```

```
% --- Електромеханіка ---
```

```
Params.Unom = 24;
Params.Ra = 12.0;
Params.Ke = 0.15; Params.Km = 0.15;
Params.J_load = 0.8; Params.B_load = 1.0; Params.Mdry = 0.2;
Params.GearRatio = 50;
```

```
% --- Траєкторія ---
```

```
Az_Start = -65; Az_End = 65;
Init_Az = [Az_Start; 0; 0];
Init_El = [30; 0; 0];
```

```
%% 2. КОНТРОЛЕРИ
```

```
% --- ПІД ---
```

```
PID.Kp = 100; PID.Ki = 50; PID.Kd = 5;
PID.N = 50; PID.Kb = 1/PID.Ki;
```

```
% --- Fuzzy ---
```

```
fis = mamfis('Name', 'SolarTrackerCtrl');
```

```
% Входи
```

```
fis = addInput(fis, [-20 20], 'Name', 'E');
fis = addMF(fis, 'E', 'trimf', [-20 -20 -2], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'E', 'trimf', [-5 -2 0], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'E', 'trimf', [-1.5 0 1.5], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'E', 'trimf', [0 2 5], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'E', 'trimf', [2 20 20], 'Name', 'PB');
```

```
fis = addInput(fis, [-10 10], 'Name', 'dE');
fis = addMF(fis, 'dE', 'trimf', [-10 -10 -2], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'dE', 'trimf', [-5 -1 0], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'dE', 'trimf', [-1 0 1], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'dE', 'trimf', [0 1 5], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'dE', 'trimf', [2 10 10], 'Name', 'PB');
```

```
% Вихід
```

```
fis = addOutput(fis, [-24 24], 'Name', 'Voltage');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-24 -24 -15], 'Name', 'NB');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-20 -10 -1], 'Name', 'NS');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [-1 0 1], 'Name', 'ZE');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [1 10 20], 'Name', 'PS');
fis = addMF(fis, 'Voltage', 'trimf', [15 24 24], 'Name', 'PB');
```

```
ruleList = [
    1 1 1 1 1; 1 2 1 1 1; 1 3 1 1 1; 1 4 1 1 1; 1 5 2 1 1;
    2 1 1 1 1; 2 2 2 1 1; 2 3 2 1 1; 2 4 2 1 1; 2 5 3 1 1;
    3 1 2 1 1; 3 2 2 1 1; 3 3 3 1 1; 3 4 4 1 1; 3 5 4 1 1;
    4 1 3 1 1; 4 2 4 1 1; 4 3 4 1 1; 4 4 4 1 1; 4 5 5 1 1;
    5 1 4 1 1; 5 2 5 1 1; 5 3 5 1 1; 5 4 5 1 1; 5 5 5 1 1;
];
fis = addRule(fis, ruleList);
```

```

%% 3. СИМУЛЯЦІЯ

fprintf('Розрахунок динаміки та енергетики...\n');

t_vec = 0:Params.Ts:Tsim;

% Функції
wrapper_pid = @(t,x) dyn_sys(t, x, PID, Params, Az_Start, Az_End, 'PID');
wrapper_fuz = @(t,x) dyn_sys(t, x, fis, Params, Az_Start, Az_End, 'Fuzzy');

[t, x_pid] = ode45(wrapper_pid, t_vec, Init_Az);
[~, x_fuz] = ode45(wrapper_fuz, t_vec, Init_Az);

az_pid = x_pid(:,1);
az_fuz = x_fuz(:,1);

% Відновлення даних
u_pid_log = zeros(size(t)); u_fuz_log = zeros(size(t));
sun_az_log = zeros(size(t));
wind_log = zeros(size(t)); rain_log = zeros(size(t)); is_day_log = zeros(size(t));
P_gen_pid = zeros(size(t)); P_cons_pid = zeros(size(t));
P_gen_fuz = zeros(size(t)); P_cons_fuz = zeros(size(t));

for i = 1:length(t)
    ti = t(i);
    [~, u_p, ref_az, ~, is_day, wind, rain] = dyn_sys(ti, x_pid(i,:), PID, Params, Az_Start, Az_End, 'PID');
    [~, u_f, ~, ~, ~, ~, ~] = dyn_sys(ti, x_fuz(i,:), fis, Params, Az_Start, Az_End, 'Fuzzy');

    sun_az_log(i) = ref_az;
    wind_log(i) = wind; rain_log(i) = rain; is_day_log(i) = is_day;
    u_pid_log(i) = u_p; u_fuz_log(i) = u_f;

    % --- ЕНЕРГЕТИКА ---
    if is_day
        W_Factor = 1.0;
        if rain > 0, W_Factor = 0.2; end

        Cos_P = max(0, cosd(ref_az - az_pid(i)));
        Cos_F = max(0, cosd(ref_az - az_fuz(i)));

        P_gen_pid(i) = Params.P_panel_peak * W_Factor * Cos_P;
        P_gen_fuz(i) = Params.P_panel_peak * W_Factor * Cos_F;
    else
        P_gen_pid(i) = 0; P_gen_fuz(i) = 0;
    end

    P_cons_pid(i) = (u_p^2) / Params.Ra;
    P_cons_fuz(i) = (u_f^2) / Params.Ra;
end

% Інтегрування
TimeK = (48 * 3600) / Tsim;
Gen_Wh_PID = trapz(t, P_gen_pid) * TimeK / 3600;
Cons_Wh_PID = trapz(t, P_cons_pid) * TimeK / 3600;
Gen_Wh_Fuz = trapz(t, P_gen_fuz) * TimeK / 3600;
Cons_Wh_Fuz = trapz(t, P_cons_fuz) * TimeK / 3600;

Net_PID = Gen_Wh_PID - Cons_Wh_PID;
Net_Fuz = Gen_Wh_Fuz - Cons_Wh_Fuz;

%% 4. РЕЗУЛЬТАТИ

fprintf('\n===== \n');
fprintf('          ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС (48 Годин)\n');
fprintf('===== \n');
fprintf('ПІД-РЕГУЛЯТОР: \n');
fprintf('  Згенеровано: %.2f Wh\n', Gen_Wh_PID);
fprintf('  Витрачено:   %.2f Wh\n', Cons_Wh_PID);
fprintf('  ПРИБУТОК:    %.2f Wh\n', Net_PID);
fprintf('----- \n');
fprintf('FUZZY-РЕГУЛЯТОР: \n');
fprintf('  Згенеровано: %.2f Wh\n', Gen_Wh_Fuz);
fprintf('  Витрачено:   %.2f Wh\n', Cons_Wh_Fuz);
fprintf('  ПРИБУТОК:    %.2f Wh\n', Net_Fuz);
fprintf('----- \n');
fprintf('ЧИСТА ЕКОНОМІЯ: +%.1f%%\n', (Cons_Wh_PID - Cons_Wh_Fuz)/Cons_Wh_PID * 100);
fprintf('===== \n');

```

%% 5. ГРАФІКИ

```
figure('Color', 'w', 'Name', 'Фігура 1: Аналіз Керування', 'Position', [20 50 800 600]);

% Траєкторія
subplot(2,1,1);
plot(t, sun_az_log, 'k--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, az_pid, 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, az_fuz, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Азимут [град]'); title('Траєкторія руху');
legend('Сонце', 'ПІД', 'Fuzzy', 'Location', 'SouthEast'); grid on; ylim([-80 80]);

% Напруга
subplot(2,1,2);
plot(t, u_pid_log, 'r-', 'LineWidth', 0.5); hold on;
plot(t, u_fuz_log, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
yline(24, 'k:'); yline(-24, 'k:');
ylabel('Напруга [В]'); xlabel('Час [с]');
title('Керуючий сигнал'); legend('ПІД', 'Fuzzy'); ylim([-30 30]); grid on;
```

%% 6. ЕНЕРГЕТИЧНІ ГРАФІКИ

```
figure('Color', 'w', 'Name', 'Фігура 2: Енергетика', 'Position', [830 50 800 600]);

% Потужність
subplot(2,1,1);
area(t, P_gen_fuz, 'FaceColor', [0.7 0.9 0.7], 'EdgeColor', 'none'); hold on;
plot(t, P_cons_pid, 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, P_cons_fuz, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Потужність [Вт]'); title('Генерація vs Споживання');
legend('Генерація', 'Витрати ПІД', 'Витрати Fuzzy'); grid on; ylim([0 500]);

% Баланс
subplot(2,1,2);
vals = [Gen_Wh_PID, -Cons_Wh_PID; Gen_Wh_Fuz, -Cons_Wh_Fuz];
b = bar(vals, 'stacked');
b(1).FaceColor = 'g'; b(2).FaceColor = 'r';
xticklabels({'PID', 'Fuzzy'});
legend('Дохід', 'Витрата', 'Location', 'EastOutside');
title(sprintf('Фінальний Баланс'));
grid on; ylabel('Wh');
```

%% 7. 3D АНІМАЦІЯ

```
fprintf('Генерація 3D анімації... \n');

video_filename = 'SolarTracker_Final_Presentation.mp4';
v = VideoWriter(video_filename, 'MPEG-4'); v.FrameRate = 30; open(v);

hFig = figure('Name', '3D Scene', 'Color', 'k', 'Position', [100 100 1200 600]);
axis equal; grid on; hold on;
xlim([-8 8]); ylim([-6 6]); zlim([0 8]); view([0 20]);
set(gca, 'Color', 'k', 'XColor', 'w', 'YColor', 'w', 'ZColor', 'w');

% Сонце
hSky = patch([-15 15 15 -15], [-10 -10 10 10], [0 0 0], [0 0 0], 'EdgeColor', 'none');
[sx, sy, sz] = sphere(20);
hSun = surf(sx, sy, sz, 'FaceColor', 'y', 'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'gouraud');
material shiny; hSunlight = light('Position', [0 0 10], 'Style', 'local');

% ЛІВА (ПІД)
plot3([-4 -4], [0 0], [0 2], 'w-', 'LineWidth', 3);
text(-4, 0, 5, 'ПІД', 'Color', 'r', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold', 'HorizontalAlignment', 'center');
[hFrameP, hPanelP, hNormP] = create_visuals('r', -4);
hRayP = plot3([0 0], [0 0], [0 0], 'r:', 'LineWidth', 1);

% ПРАВА (Fuzzy)
plot3([4 4], [0 0], [0 2], 'w-', 'LineWidth', 3);
text(4, 0, 5, 'Fuzzy', 'Color', 'b', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold', 'HorizontalAlignment', 'center');
[hFrameF, hPanelF, hNormF] = create_visuals('b', 4);
hRayF = plot3([0 0], [0 0], [0 0], 'b:', 'LineWidth', 1);

hStatus = text(0, 0, 7.5, '', 'Color', 'w', 'FontSize', 14, 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontWeight', 'bold');
hEnergyTxt = text(0, -5, 1, '', 'Color', 'y', 'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'center', 'BackgroundColor', [0.1 0.1 0.1]);

hRainGroup = hggroup; hWindGroup = hggroup;
```

```

t_anim = 1:5:length(t);
cum_gen_vec = cumtrapz(t, P_gen_fuz) * TimeK / 3600;
cum_cons_p_vec = cumtrapz(t, P_cons_pid) * TimeK / 3600;
cum_cons_f_vec = cumtrapz(t, P_cons_fuz) * TimeK / 3600;

for i = t_anim
    delete(get(hRainGroup, 'Children')); delete(get(hWindGroup, 'Children'));

    cycle_t = mod(t(i), 20); is_day = (cycle_t <= 10);

    % Координати Сонця
    if is_day
        prog = cycle_t / 10;
        az_sun = Az_Start + (Az_End - Az_Start) * prog;
        el_sun = 60 * sin(prog * pi);
    else
        az_sun = Az_Start; el_sun = 0;
    end

    sun_dist = 8;
    sun_x = sun_dist * sind(az_sun) * cosd(el_sun);
    sun_y = -sun_dist * cosd(az_sun) * cosd(el_sun);
    sun_z = sun_dist * sind(el_sun);

    if is_day
        if rain_log(i) > 0
            set(hStatus, 'String', 'ДОЩ');
            set(hSky, 'FaceColor', [0.2 0.2 0.3]);
            for r=1:40, plot3(-10+20*rand, -2+4*rand, 2+6*rand, 'c.', 'Parent', hRainGroup); end
        elseif abs(wind_log(i)) > 2
            set(hStatus, 'String', 'БІТЕР (ПІД БОРЕТЬСЯ)');
            set(hSky, 'FaceColor', [0.6 0.6 0.7]);
            for w=1:10, quiver3(-8+16*rand, 0, 2+4*rand, 3, 0, 0, 0, 'Color','r','LineWidth',2,'Parent',hWindGroup); end
        else
            set(hStatus, 'String', 'ЯЧО');
        end
    end

    set(hSun, 'Visible','on', 'XData', sx*0.8+sun_x, 'YData', sy*0.8+sun_y, 'ZData', sz*0.8+sun_z);
    set(hSunLight, 'Visible','on', 'Position', [sun_x sun_y sun_z]);
    set(hRayP, 'Visible','on', 'XData', [-4 sun_x], 'YData', [0 sun_y], 'ZData', [2 sun_z]);
    set(hRayF, 'Visible','on', 'XData', [4 sun_x], 'YData', [0 sun_y], 'ZData', [2 sun_z]);

    else
        set(hSky, 'FaceColor', [0.05 0.05 0.1]); set(hStatus, 'String', 'НІЧ');
        set(hSun, 'Visible','off'); set(hSunLight, 'Visible','off');
        set(hRayP, 'Visible','off'); set(hRayF, 'Visible','off');
    end

    % Оновлення панелей
    update_visuals(hFrameP, hPanelP, hNormP, -4, az_pid(i), 30);
    update_visuals(hFrameF, hPanelF, hNormF, 4, az_fuz(i), 30);

    net_p = cum_gen_vec(i) - cum_cons_p_vec(i);
    net_f = cum_gen_vec(i) - cum_cons_f_vec(i);
    set(hEnergyTxt, 'String', sprintf('Вигода (Wh)\nПІД: %.1f | Fuzzy: %.1f', net_p, net_f));

    drawnow;
    frame = getframe(hFig);
    writeVideo(v, frame);
end
close(v); close(hFig);
fprintf('Відео збережено.\n');

```

```
%% ФУНКЦІЇ
```

```
function [dx, u_applied, ref_az, ref_el, is_day, wind, rain] = dyn_sys(t, x, Ctrl, P, AzStart, AzEnd, Type)
    theta = x(1); omega = x(2); integ = x(3);
    cycle_t = mod(t, 20); total_t = t;
    wind = 0; rain = 0;

    if cycle_t <= 10
        is_day = 1;
        prog = cycle_t / 10;
        ref_az = AzStart + (AzEnd - AzStart) * prog;
        ref_el = 60 * sin(prog * pi);

        if total_t > 5 && total_t < 8, rain = 1; end
        if total_t > 22 && total_t < 35
            wind = 8 * sin(3*t) + 3 * randn;
        end
    else
        is_day = 0; ref_az = AzStart; ref_el = 0;
    end

    e = ref_az - theta;

    if strcmp(Type, 'PID')
        e_in = e + wind * 0.15;
        u_calc = Ctrl.Kp*e_in + Ctrl.Ki*integ - Ctrl.Kd*omega;
        if (abs(u_calc) > P.Unom) && (sign(e) == sign(u_calc)), d_integ = 0; else, d_integ = e; end
    else
        dedt = -omega;
        in1 = max(min(e, 20), -20); in2 = max(min(dedt, 10), -10);
        u_calc = evalfis(Ctrl, [in1, in2]);
        d_integ = 0;
    end

    u_applied = max(min(u_calc, P.Unom), -P.Unom);

    Current = (u_applied - P.Ke*omega*P.GearRatio) / P.Ra;
    Torque = P.Km * Current * P.GearRatio;
    Fric = P.Mdry * tanh(100*omega) + P.B_load*omega;
    alpha = (Torque - Fric + wind) / P.J_load;
    dx = [omega; alpha; d_integ];
end

function [dx, u_applied, ref_el] = dyn_elev(t, x, Ctrl, P, ElStart, ElEnd, Type)
    theta = x(1); omega = x(2); integ = x(3);
    cycle_t = mod(t, 20);
    if cycle_t <= 10
        ref_el = 60 * sin((cycle_t/10) * pi);
    else
        ref_el = 30;
    end

    e = ref_el - theta;
    if strcmp(Type, 'PID')
        u_calc = Ctrl.Kp*e + Ctrl.Ki*integ - Ctrl.Kd*omega;
        if (abs(u_calc) > P.Unom) && (sign(e) == sign(u_calc)), d_integ = 0; else, d_integ = e; end
    else
        dedt = -omega;
        u_calc = evalfis(Ctrl, [max(min(e,10),-10), max(min(dedt,5),-5)]);
        d_integ = 0;
    end

    u_applied = max(min(u_calc, P.Unom), -P.Unom);

    dx = [omega; (u_applied - omega)/P.J_load; d_integ];
end

function [hFrame, hPanel, hNorm] = create_visuals(color, x_pos)
    hFrame = patch([-0.5 0.5 0.5 -0.5]+x_pos, [-0.2 -0.2 0.2 0.2], [2 2 2 2], [0.3 0.3 0.3], 'EdgeColor', 'k');
    hPanel = patch([-1 1 1 -1]+x_pos, [-0.8 -0.8 0.8 0.8], [2 2 2 2], color, 'FaceAlpha', 0.9, 'EdgeColor', 'k');
    hNorm = plot3([x_pos x_pos], [0 0], [2 4], 'Color', 'g', 'LineWidth', 2);
end
```

```

function update_visuals(hFrame, hPanel, hNorm, x_pos, az, el)
    rad_az = deg2rad(az);
    Rz = [cos(rad_az) -sin(rad_az) 0; sin(rad_az) cos(rad_az) 0; 0 0 1];
    Pf = Rz * [[-0.5 0.5 0.5 -0.5]; [-0.2 -0.2 0.2 0.2]; [0 0 0 0]];
    set(hFrame, 'XData', Pf(1,:)+x_pos, 'YData', Pf(2,:), 'ZData', Pf(3,:)+2);

    rad_el = deg2rad(90-el);
    Rx = [1 0 0; 0 cos(rad_el) -sin(rad_el); 0 sin(rad_el) cos(rad_el)];
    Pp = Rz * (Rx * [[-1 1 1 -1]; [-0.8 -0.8 0.8 0.8]; [0 0 0 0]]);
    set(hPanel, 'XData', Pp(1,:)+x_pos, 'YData', Pp(2,:), 'ZData', Pp(3,:)+2);

    N_rot = Rz * (Rx * [0; 0; 3]);
    set(hNorm, 'XData', [x_pos, x_pos+N_rot(1)], 'YData', [0, N_rot(2)], 'ZData', [2, 2+N_rot(3)]);
end

```

Додаток 2. Скрипт комплексного порівняльного аналізу та енергетичного аудиту системи керування.