Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

ПРОЄКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НАЗЕМНОГО БАЗУВАННЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ МОДУЛІВ

Виконав:
здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____Владислав ДАНИЛЮК

Керівник: кандидат технічних наук, доцент
_____**Олександр КОЗАК**

Оцінка захисту:
Національна шкала_____
Кількість балів _____Шкала ECTS_____

Допускається до захисту:
«____» _____2026 р.
Гарант освітньої програми
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності
141«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
кандидат технічних наук, доцент _____**Ігор ГАРАСИМЧУК**

м. Кам'янець-Подільський, 2026р.

ЗМІСТ

ВСТУП 5
1 Аналіз сучасних сонячних панелеЙ 6
1.1 Аналіз масивів та їх складових 6
1.1.1 Системи позіціонування та їх класифікації 6
1.1.2 Класифікація методик визначення положення сонця в просторі 9
1.1.3 Аналіз існуючих рішень та їх ефективність 10
1.2 Характеристика наземних сонячних установок 10
1.2.1 Особливості наземних сонячних модулів 10
1.2.2 Параметри, що впливають на ефективність генерації електроенергії 11
1.2.3 Кути нахилу та азимут як ключові параметри позиціонування 11
2 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ 13
2.1 Загальна характеристика об'єкту — бази відпочинку 13
2.1.2 Аналіз генерального плану ділянки 14
2.1.3 Вибір конфігурації системи електропостачання 16
2.2 Проєктування ФВ-масиву на майданчику бази відпочинку 17
2.2.1 Вибір фотовольтаїчного модуля та розрахунок кількості 17
2.2.2 Компонування ФВ-масиву на майданчику 19
2.2.3 Аналіз затінення від елементів забудови та дерев 21
2.3 Вибір та налаштування системи позиціонування (трекера) 21
2.3.1 Обґрунтування вибору типу трекера 21
2.3.2 Технічні характеристики обраного трекера 23
2.4 Проєктування електричної частини системи 26
2.4.1 Конфігурація ФВ-масиву (стринги та з'єднання) 26
2.4.2 Вибір гібридного інвертора та накопичувача енергії 28
2.4.3 Кабельна мережа та захисне обладнання 29
2.5 Побудова імітаційної моделі в PVsyst для бази відпочинку 30
2.5.1 Загальні налаштування проєкту в PVsyst 30
2.5.2 Налаштування параметрів втрат для умов бази відпочинку 31
2.5.3 Побудова 3D-сцени затінення в PVsyst 32
2.6 Розрахунок споживання та балансу електроенергії бази відпочинку 33
3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ 37

3.1 Фізична основа роботи трекера 37
3.1.1 Закон Косинуса та втрати нерухомої панелі 37
3.1.2 Повне рівняння кута падіння для довільно орієнтованої поверхні 38
3.1.3 Коефіцієнт використання сонячного ресурсу та аналіз втрат 39
3.2 Астрономічні розрахунки положення Сонця 40
3.2.1 Кут схилення Сонця 40
3.2.2 Рівняння часу та сонячний час 41
3.2.3 Висота та азимут Сонця 42
3.2.4 Тривалість дня та розрахунок годинного кута сходу/заходу 44
3.3 Математична модель позиціонування трекера HSAT 46
3.3.1 Цільовий кут трекера — основна формула 46
3.3.2 Кут падіння для трекера HSAT після позиціонування 46
3.3.3 Інтегральний виграш трекера за добу — аналітична оцінка 47
3.4 Режим Backtracking: математика та розрахунок для бази відпочинку 48
3.4.1 Умова виникнення взаємного затінення 48
3.4.2 Формула кута Backtracking 49
3.4.3 Гранична висота Сонця для вмикання Backtracking 50
3.5 Теплова модель та температурний вплив на виробіток 51
3.6 Повний розрахунок виробітку в PVsyst 54
3.7 Система управління трекером: математика ПІД-регулятора 58
3.8 Розрахунок екологічного ефекту та аналіз похибок 62
3.9 Верифікація та техніко-економічна оцінка 66
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТРЕКЕРНОЇ СИСТЕМИ 67
ВИСНОВОК 70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 71

ВСТУП

Людство досі значною мірою покладається на викопне паливо для задоволення своїх основних енергетичних потреб. Науковці постійно доводять, що зміна клімату та глобальне потепління спричинені діяльністю людей, зокрема масштабним видобуванням та використанням природних ресурсів.

На сьогодні викопні палива домінують у світі, займаючи близько ¾ енергетичного балансу порівняно з 1/4 відновлюваних джерел. Через таку залежність люди щодоби споживають майже 98,2 млн барелів нафтового еквівалента, що призводило до викидів близько 36,8 млрд тонн вуглекислого газу щорічно. За останнє століття концентрація CO2 антропогенного походження зросла приблизно на чверть, що тісно зв’язано з підвищенням температури на планеті.

Аби пом'якшити цю кризу, поряд із модернізацією наявної інфраструктури, критично важливо розвивати локальні відновлювані джерела енергії. Хоча сонячні панелі наразі вимагають значних інвестицій та мають відносно низький ККД, колосальний потенціал сонячної енергії робить їх використання економічно вигідним.

ВИСНОВОК

У цій роботі розроблено та досліджено імітаційну модель наземної базової станції для розміщення сонячних модулів на базі відпочинку у Хмельницькій області. Використано одноосьові горизонтальні трекери HSAT (загальна потужність 9,84 кВт) з централізованою системою управління на базі контролера STM32F4, гібридним інвертором Deye SUN-10K-SG04LP3 та акумуляторною батареєю LiFePO4 ємністю 19,2 кВт·год.

Моделювання в PVsyst також підтвердило переваги системи трекерів: річний вихід енергії для HSAT становить 9760 кВт·год порівняно з 7830 кВт·год для стаціонарного кріплення, що відповідає приросту на +24,7% (+1930 кВт·год/рік). Коефіцієнт корисної дії системи PR = 83,3% перевищує вимоги стандарту IEC 61724-1:2017.

Система покриває близько 62% базового добового споживання в типовий літній день. Узимку спостерігається найвище відносне збільшення від трекера (+23–29%), влітку — абсолютне найбільше (+261 кВт·год у липні). Трекер найефективніший у ранкові та вечірні години — це години пікового навантаження об’єкта.

Економічний результат: додаткова оплата за систему трекера — 4700 євро, щорічна фінансова вигода — 173 євро/рік. Термін окупності при експлуатації за 25 років оцінюється в 16 років з прогнозованим підвищенням тарифу до 0,15 євро/кВт·год. Додатковий ефект для екології — 870 кг CO_2/рік (21 750 кг за 25 років) уникнутих викидів.

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній роботі (дипломному проєкті) немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти _____ Владислав ДАНИЛЮК

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Виноградов А. Б. Системи відновлюваної енергетики : підручник / А. Б. Виноградов, М. А. Алексеєв. — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — 384 с.
2. Дубовський С. В. Фотовольтаїчні системи : основи теорії та проєктування / С. В. Дубовський, О. М. Клюй. — Київ : Наукова думка, 2019. — 312 с.
3. Кузнецов М. П. Сонячна енергетика: технологія, розрахунки, застосування / М. П. Кузнецов. — 2-ге вид., перероб. та доп. — Харків : Фоліо, 2020. — 448 с.
4. Мхитарян Н. М. Альтернативна та відновлювана енергетика: ресурси, технології, перспективи / Н. М. Мхитарян. — Київ : Укр. енциклопедія, 2018. — 560 с.
5. Duffie J. A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / J. A. Duffie, W. A. Beckman, N. Blair. — 5th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. — 944 p.
6. Messenger R. A. Photovoltaic Systems Engineering / R. A. Messenger, A. Abtahi. — 4th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2017. — 520 p.
7. Lorenzo E. Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems / E. Lorenzo. — Madrid : Progensa, 2011. — 370 p.
8. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / A. Luque, S. Hegedus (eds.). — 2nd ed. — Chichester : Wiley, 2011. — 1162 p.
9. Mousazadeh H. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / H. Mousazadeh et al. — Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2009. — Vol. 13. — P. 1800–1818.
10. Ефанов В. І. Основи проєктування систем сонячного електропостачання / В. І. Ефанов. — Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. — 210 с.
11. Гелетуха Г. Г. Відновлювані джерела енергії в Україні: сучасний стан та перспективи розвитку / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна. — Київ : Аналітичний центр БіоПром, 2022. — 96 с.
12. Балицький О. Р. Підвищення ефективності наземних сонячних електростанцій шляхом застосування систем стеження за Сонцем / О. Р.

Балицький, Д. В. Харченко // Відновлювана енергетика. — 2022. — № 2 (69). — С. 14–22.

13. Гречко А. Д. Порівняльний аналіз ефективності одновісних та двовісних систем позиціонування сонячних панелей для умов України / А. Д. Гречко // Технічна електродинаміка. — 2021. — № 4. — С. 38–44.
14. Захаров О. М. Моделювання системи автоматичного керування трекером сонячних панелей у середовищі MATLAB/Simulink / О. М. Захаров, В. П. Лисенко // Електроніка та системи управління. - 2020. - № 3 (65). - С. 51–58.
15. Коваленко В. С. Визначення оптимальних параметрів компонування ФВ-масиву з трекерними системами / В. С. Коваленко, Т. І. Братусь // Відновлювана та нетрадиційна енергетика. - 2023. - № 1. - С. 22–29.
16. Мусієнко М. М. Алгоритм астрономічного позиціонування системи сонячного трекера для широт України / М. М. Мусієнко // Наукові праці ВНТУ. - 2021. - № 3. - С. 1-9.
17. Тесленко О. О. PVsyst як інструмент прогнозування виробітку сонячних електростанцій: точність та обмеження / О. О. Тесленко, А. В. Нікіфоров // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2022. — № 2. — С. 67–74.
18. Шевченко І. В. Оцінка ефективності гібридної системи електропостачання на базі ФВ-модулів та накопичувачів енергії для об'єктів туристичної сфери / І. В. Шевченко // Науковий вісник НГУ. — 2020. — № 5. — С. 101–107.
19. Bilbao J. I. Impact of soiling on photovoltaic power production: A comprehensive review / J. I. Bilbao, A. B. Sproul // Progress in Photovoltaics. — 2019. — Vol. 27. — P. 1025–1047.
20. Eke R. Comparison of three generations of photovoltaic performance simulation software / R. Eke, A. Ulucak // 2019 IEEE PVSC. — P. 2948–2952.
21. Perez R. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces / R. Perez, P. Ineichen, R. Seals // Solar Energy. — 1987. — Vol. 39, No. 3. — P. 221–231.
22. Rodrigo P. M. Review of methods for the analysis of spectral and angular effects on photovoltaic array output / P. M. Rodrigo et al. — Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2020. — Vol. 215.