

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Зибалов Дмитро Сергійович

УДК 681.5:621.311.243

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ
МАЛОПОТУЖНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ**

Спеціальність 151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Д.С. Зибалов

Науковий керівник - Бубліков Андрій Вікторович, доктор технічних наук,
професор

Дніпро - 2026

АНОТАЦІЯ

Зибалов Д.С. Автоматизація процесів керування автономними малопотужними фотоелектричними установками. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (15 «Автоматизація та приладобудування»). - Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» МОН України, Дніпро, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання, яке підвищує ефективність використання сонячної фотоелектричної установки (СФУ) за рахунок ефективного керування її положенням у просторі.

Метою роботи є підвищення ефективності малопотужних автономних сонячних фотоелектричних установок шляхом розроблення алгоритму керування просторовим положенням СФП з урахуванням метеорологічних умов та співвідношення приросту згенерованої енергії до витрат на позиціонування.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування просторовим положенням сонячного фотоелектричного перетворювача автономної малопотужної фотоелектричної установки з урахуванням змінних метеорологічних умов.

Предметом дослідження є математичні та імітаційні моделі, методи та алгоритми автоматичного керування просторовим положенням СФП з урахуванням рівня хмарності та витрат енергії на позиціонування СФП у просторі.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Експериментально обґрунтовано умови, за яких у режимі переважання розсіяної складової сонячного випромінювання горизонтальне положення СФП забезпечує більшу генерацію електричної енергії порівняно з режимом постійного орієнтування площини СФП за нормаллю до напрямку на Сонце.

2. Удосконалено критерій оцінювання ефективності функціонування автономної малопотужної СФУ, який, на відміну від існуючих підходів оцінювання лише за валовою згенерованою енергією, враховує корисний приріст

енергії, тобто з вирахуванням енергетичних витрат на пошук оптимального положення СФП, а також витрат, пов'язаних з технічним обслуговуванням системи.

3. Вперше обґрунтовано вибірковий коефіцієнт варіації потужності, яку генерує СФП, як інформаційний параметр для оцінки ступеня хмарності в системі адаптивного керування положенням СФП у просторі.

4. Набув подальшого розвитку метод керування просторовим положенням СФП за рахунок введення адаптивного перемикачів режимів орієнтування за розрахованим положенням Сонця, екстремального пошуку та горизонтального положення залежно від інформаційного критерію хмарності.

5. Набула подальшого розвитку імітаційна модель системи автоматичного керування положенням автономної малопотужної СФУ, у якій враховано зміну положення Сонця, хмарність, електричні параметри СФП, алгоритм позиціонування СФП у просторі та енергетичні витрати на його переміщення, що дає змогу порівнювати режими керування положенням СФП за згенерованою енергією.

6. Для відтворення змінних метеорологічних умов під час оцінювання ефективності алгоритмів керування положенням СФП в моделі системи керування використано погодинні значення ступеня хмарності, отримані з супутникових даних NASA, зокрема на основі продуктів Global Cloud Composite (GCC), що дозволило забезпечити адекватність моделі.

Практичні результати:

1. Запропоновано алгоритмічну реалізацію адаптивного керування положенням СФП, у якій режим позиціонування обирається за значенням ковзного коефіцієнта варіації потужності та поточним розрахунковим положенням Сонця.

2. Розроблено алгоритм перемикачів режимів керування СФП, який залежно від стану хмарності визначає оптимальне положення СФП у просторі: у сонячну погоду та за умови незначної хмарності забезпечується екстремальне стеження за максимальною потужністю, за умови суцільної хмарності - переведення СФП у горизонтальне положення для використання розсіяної радіації.

3. Розроблено програмно-апаратний комплекс, який дозволяє провести оцінку миттєвої потужності, яку генерує СФП, та здійснює логування результатів у файл з прив'язкою до часових міток, що забезпечує можливість подальшого аналізу динаміки генерації, оцінювання статистичних характеристик (зокрема середнього значення, дисперсії та коефіцієнта варіації), а також порівняння ефективності різних алгоритмів керування в умовах змінних метеорологічних умов.

Практичне значення дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні алгоритмічного, модельного та програмно-апаратного забезпечення для адаптивного керування положенням СФП автономних малопотужних СФУ. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування автономних систем електроживлення малопотужних споживачів, а також плануються до впровадження на базі об'єктів НТУ “Дніпровська політехніка”.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та завдання дослідження. Розглянуто основні проблеми сонячної енергетики, наведено дані про апробацію результатів та публікації автора за темою роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих рішень. Описано причини неможливості СФП працювати з повною віддачею протягом усього дня та проведено дослідження впливу на генеровану потужність СФП кута падіння сонячних променів на поверхню СФП. На підставі досліджень запропоновано для позиціонування СФП у просторі створення алгоритму керування положенням СФП при ідентифікації системою факторів, які впливають на генеровану потужність.

У другому розділі проведено математичне моделювання процесів генерації електричної енергії СФП в умовах змінної інсоляції та зміни положення Сонця на небосхилі. Проведено обґрунтування вибору моделей для визначення просторового положення Сонця на основі географічних координат і часу, що дозволяє розраховувати висоту Сонця, азимут і сонячний час.

Для оцінювання інтенсивності сонячного випромінювання використано модель ясного неба з подальшою корекцією за даними хмарності, що забезпечує формування реалістичної кривої миттєвої іррадіації протягом доби за різних метеоумов. Для визначення електричних характеристик СФП використано модель одного діода, яка враховує основні фізичні процеси перетворення енергії, включаючи генерацію фотоструму, вплив внутрішніх опорів і температури. На основі цієї моделі здійснюється розрахунок вольт-амперних характеристик та миттєвої потужності з виділенням точки максимальної потужності. Додатково враховано режим роботи СФП на навантаження, що дозволяє оцінити відмінність між реальною та максимально можливою потужністю. Розроблений алгоритм моделювання забезпечує побудову добових кривих потужності СФП та дозволяє аналізувати вплив кута падіння сонячних променів і атмосферних факторів на ефективність генерації.

У третьому розділі проведено класифікацію погодних умов за характеристиками освітленості. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність дискретного коригування положення СФП у просторі з часовим інтервалом, що забезпечує баланс між приростом енергії та витратами на переміщення.

Встановлено, що ключовим чинником підвищення ефективності є забезпечення роботи СФП у точці максимальної потужності, оскільки навіть незначні відхилення від Maximum Power Point призводять до суттєвих втрат енергії. У зв'язку з цим досліджено алгоритми пошуку положення точки максимальної потужності з урахуванням змінних умов освітленості та динаміки інсоляції, зокрема при проходженні хмар.

Окрему увагу приділено впливу хмарності на процес генерації, для чого на основі експериментальних даних напруги та струму розроблено спосіб класифікації хмарності на основі статистичної оцінки потужності. Показано, що використання дисперсії, стандартного відхилення та коефіцієнта варіації дозволяє кількісно оцінювати нестабільність генерації та класифікувати погодні умови за рівнем хмарності.

На основі отриманих показників визначено порогові значення, що дають змогу розрізняти ясні, змінні та хмарні умови та відповідно коригувати положення СФП. Експериментально підтверджено, що за ясного неба ефективним є орієнтування перпендикулярно до сонячних променів, тоді як за умов значної хмарності доцільним є горизонтальне положення, яке забезпечує кращу генерацію розсіяної радіації. На основі проведеного аналізу та отриманих в ході експерименту даних розроблено алгоритм керування положенням СФП з урахуванням рівня хмарності.

У четвертому розділі з метою підтвердження адекватності розробленої імітаційної моделі об'єкта керування створено фізичну модель - реальний сонячний фотоелектричний перетворювач з механічною системою зміни його положення та відповідною підсистемою керування. Описано створену механічну конструкцію трекара, яка забезпечує позиціонування сонячного фотоелектричного перетворювача у двох ортогональних площинах, що дозволяє змінювати кут нахилу та азимут відповідно до положення Сонця. Розроблено структурну схему системи керування. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований алгоритм і дозволяє адаптувати режим роботи СФП до поточних погодних умов. Показано, що алгоритм не потребує значних обчислювальних ресурсів і може бути реалізований без використання складних сенсорних систем, що підвищує надійність та автономність роботи.

Встановлено, що вдосконалений алгоритм забезпечує зростання річної генерації електроенергії та дозволяє досягти економічного ефекту з прийнятним терміном окупності.

Ключові слова: *автоматизація, коефіцієнт хмарності, сонячний фотоелектричний перетворювач, точка максимальної потужності, іррадіація, інсоляція, відновлювальні джерела енергії, операційний підсилювач, датчик струму, дільник напруги, аналого-цифровий перетворювач, азимут, кут нахилу, розроблений алгоритм керування, датчик температури.*

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Д.С. Зибалов, “Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача”, Енергетика і автоматика, №5 2022 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>

2. Д.С. Зибалов, К.В. Соснін, “Підвищення ефективності фотоелектричного перетворювача методом пошуку точки максимальної потужності ”, Енергетика і автоматика, №5 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya5\(81\).2025.103](https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.103)

3. Д.С. Зибалов “Вплив кута нахилу сонячного фотоелектричного перетворювача на генеровану потужність в умовах хмарності та статистичний критерій доцільності трекінгу”, Енергетика і автоматика, №2 2026 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

4. Д.С. Зибалов, “Вимірювання опору за допомогою розбалансованого вимірювального моста Уітсона”, Енергетика і автоматика, №2, 2024р . (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya2\(72\).2024.162](https://doi.org/10.31548/energiya2(72).2024.162)

5. Д.С. Зибалов, “Моделювання сонячного фотоелектричного перетворювача в спеціалізованому програмному середовищі MATLAB”, Енергетика і автоматика, №6 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya6\(82\).2025.100](https://doi.org/10.31548/energiya6(82).2025.100)

ABSTRACT

Zybalov Dmytro Serhiyovych. “Automation of control processes for autonomous low-power photovoltaic systems”. Qualification scientific work as a manuscript. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. (15 Automation and Instrumentation) - Dnipro University of Technology of the Ministry of education and science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation addresses a relevant scientific problem aimed at improving the efficiency of a solar photovoltaic system (PV system) through optimal control of its spatial orientation.

The purpose of the work is to improve the efficiency of low-power autonomous solar photovoltaic systems by developing an algorithm for controlling the spatial position of the photovoltaic panel (PV panel), taking into account meteorological conditions and the ratio of the increase in generated energy to the energy costs of positioning.

The object of the study is the process of automatic control of the spatial position of a solar photovoltaic converter in a low-power autonomous photovoltaic system under variable meteorological conditions.

The subject of the study includes mathematical and simulation models, methods, and algorithms for automatic control of the spatial position of the PV panel, considering cloudiness levels and energy consumption for positioning the panel in space.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The conditions under which, in the regime dominated by the diffuse component of solar radiation, the horizontal position of the PV panel provides higher electrical energy generation compared to continuous orientation perpendicular to the direction of the Sun have been experimentally substantiated.
2. An improved criterion for evaluating the efficiency of low-power autonomous photovoltaic systems has been developed. Unlike existing approaches based solely on gross generated energy, it accounts for the useful energy gain, i.e., net of the energy consumed for searching the optimal panel position, as well as maintenance-related energy costs.
3. For the first time, the sample coefficient of variation of the power generated by the PV panel has been substantiated as an informative parameter for assessing cloudiness in an adaptive control system for panel positioning.
4. The method for controlling the spatial position of the PV panel has been further developed by introducing adaptive switching between orientation modes based on the

calculated solar position, extremum seeking, and horizontal positioning depending on the cloudiness information criterion.

5. The simulation model of the automatic control system for a low-power autonomous photovoltaic system has been further developed.

6. The model accounts for solar position changes, cloudiness, electrical parameters of the PV panel, the positioning algorithm, and energy consumption for movement, enabling comparison of control modes in terms of generated energy. To reproduce variable meteorological conditions when evaluating control algorithms, hourly cloudiness data obtained from NASA satellite sources, particularly the Global Cloud Composite (GCC) products, have been used, ensuring model adequacy.

Practical results:

1. An algorithmic implementation of adaptive control of PV panel positioning has been proposed, where the positioning mode is selected based on the moving coefficient of variation of power and the current calculated solar position.

2. A control mode switching algorithm has been developed, which determines the optimal spatial position of the PV panel depending on cloudiness conditions: under clear or slightly cloudy conditions, extremum tracking of maximum power is ensured; under overcast conditions, the panel is set to a horizontal position to utilize diffuse radiation.

3. A hardware-software system has been developed to evaluate the instantaneous power generated by the PV panel and to log results into a file with time stamps, enabling further analysis of generation dynamics, estimation of statistical characteristics (including mean value, variance, and coefficient of variation), and comparison of the efficiency of different control algorithms under variable meteorological conditions.

The practical significance of the dissertation corresponds to the scientific direction of the Department of Cyber-Physical and Information-Measuring Systems of the Dnipro University of Technology. The practical value of the obtained results lies in the development of algorithmic, modeling, and hardware-software support for adaptive control of PV panel positioning in autonomous low-power photovoltaic systems. The research results can be used in the design of autonomous power supply systems for

low-power consumers and are planned for implementation at the facilities of Dnipro University of Technology.

In the introduction, the relevance of the topic is substantiated, and the aim and objectives of the research are defined. The main problems of solar energy are considered, and data on the approbation of the results and the author's publications on the topic of the work are presented.

In the first chapter, an analysis of existing solutions is carried out. The reasons why a solar photovoltaic converter (SPC) cannot operate at full efficiency throughout the entire day are described, and the influence of the angle of incidence of solar radiation on the surface of the photovoltaic converter on the generated power is investigated. Based on the conducted research, the development of a control algorithm for the spatial positioning of the SPC is proposed, taking into account the system's identification of factors affecting the generated power.

In the second chapter, mathematical modeling of the processes of electrical energy generation of the SPC under conditions of variable solar irradiation and changing Sun position in the sky is carried out. The justification for selecting models to determine the spatial position of the Sun based on geographic coordinates and time is provided, which allows calculating solar elevation, azimuth, and solar time. To evaluate solar irradiance intensity, a clear-sky model is used with subsequent correction based on cloudiness data, which enables the formation of a realistic curve of instantaneous irradiance throughout the day under different meteorological conditions.

For determining the electrical characteristics of the SPC, a single-diode model is applied, which accounts for the main physical processes of energy conversion, including photogenerated current, internal resistances, and temperature effects. Based on this model, current-voltage characteristics and instantaneous power are calculated with identification of the maximum power point. Additionally, the operating mode of the SPC under load conditions is considered, which allows evaluating the difference between actual and maximum achievable power. The developed modeling algorithm enables the construction of daily power curves of the SPC and allows analysis of the influence of the solar incidence angle and atmospheric factors on generation efficiency.

In the third chapter, a classification of weather conditions based on illumination characteristics is carried out. Based on the conducted analysis, the feasibility of discrete adjustment of the spatial position of the solar photovoltaic converter (SPC) with a time interval that ensures a balance between the increase in generated energy and the energy consumption for repositioning is substantiated.

It is established that a key factor in improving efficiency is ensuring the operation of the SPC at the Maximum Power Point, since even minor deviations from the Maximum Power Point lead to significant energy losses. In this regard, algorithms for tracking the Maximum Power Point are investigated, taking into account variable illumination conditions and insolation dynamics, particularly during cloud passage.

Special attention is paid to the influence of cloudiness on the generation process. For this purpose, based on experimental voltage and current data, a method for cloudiness classification using statistical evaluation of power is developed.

It is shown that the use of variance, standard deviation, and coefficient of variation allows for a quantitative assessment of generation instability and classification of weather conditions according to cloudiness level. Based on the obtained indicators, threshold values are determined that make it possible to distinguish between clear, variable, and cloudy conditions and accordingly adjust the position of the SPC.

It is experimentally confirmed that under clear sky conditions, the most efficient orientation is perpendicular to solar radiation, whereas under significant cloudiness, a horizontal position is preferable, as it provides better utilization of diffuse radiation. Based on the conducted analysis and experimental data, a control algorithm for adjusting the SPC position with regard to cloudiness level is developed.

In the fourth chapter, in order to validate the adequacy of the developed simulation model of the control object, a physical model is created - a real solar photovoltaic converter with a mechanical positioning system and an appropriate control subsystem. The developed mechanical tracker design is described, which enables positioning of the solar photovoltaic converter in two orthogonal planes, allowing adjustment of both tilt angle and azimuth according to the Sun position.

A structural diagram of the control system is developed. Software is implemented to realize the proposed algorithm and to adapt the operating mode of the SPC to current weather conditions. It is shown that the algorithm does not require significant computational resources and can be implemented without the use of complex sensor systems, which increases the reliability and autonomy of operation.

Keywords: *cloudiness coefficient, solar photovoltaic converter (SPC), maximum power point, irradiance, insolation, renewable energy sources, operational amplifier, current sensor, voltage divider, analog-to-digital converter, azimuth, tilt angle, optimal control algorithm, temperature sensor.*

List of publications of the applicant

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. D.S. Zybalov, “Investigation of the influence of the incidence angle of solar radiation on the surface of a photovoltaic solar converter on generated power”, *Energetics and Automation*, No. 5, 2022 (Scientific professional journal of Ukraine, Category “B”), URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>

2. D.S. Zybalov, K.V. Sosnin, “Improving the efficiency of a photovoltaic converter by means of maximum power point tracking”, *Energetics and Automation*, No. 5, 2025 (Scientific professional journal of Ukraine, Category “B”), URL: [https://doi.org/10.31548/energiya5\(81\).2025.103](https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.103)

3. D.S. Zybalov, “Influence of the tilt angle of a photovoltaic solar converter on generated power under cloudiness conditions and a statistical criterion for tracking feasibility”, *Energetics and Automation*, No. 2, 2026 (Scientific professional journal of Ukraine, Category “B”).

4. D.S. Zybalov, “Measurement of resistance using an unbalanced Wheatstone bridge”, *Energetics and Automation*, No. 2, 2024 (Scientific professional journal of Ukraine, Category “B”), URL: [https://doi.org/10.31548/energiya2\(72\).2024.162](https://doi.org/10.31548/energiya2(72).2024.162)

5. D.S. Zybalov, “Modeling of a photovoltaic solar converter in the specialized software environment MATLAB”, *Energetics and Automation*, No. 6, 2025 (Scientific

professional journal of Ukraine, Category “B”), URL:
[https://doi.org/10.31548/energiya6\(82\).2025.100](https://doi.org/10.31548/energiya6(82).2025.100)

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 Аналіз фотоелектричних систем та методів підвищення ефективності їх функціонування.....	25
1.1 Аналіз наукових публікацій у сфері фотоелектричних систем.....	25
1.2 Класифікація та огляд сонячних фотоелектричних установок.....	28
1.3 Аналіз ефективності використання СФУ на території України.....	31
1.4 Малопотужні сонячні фотоелектричні установки.....	33
1.5. Аналіз способів підвищення ефективності роботи СФУ.....	35
1.6 Постановка задачі дослідження.....	36
Висновки до розділу 1.....	38
РОЗДІЛ 2 Фізико-математичне моделювання процесів сонячного випромінювання та фотоперетворення енергії.....	40
2.1 Природа сонячного випромінювання.....	40
2.1.1 Рух Землі навколо Сонця.....	40
2.1.2 Справжній сонячний час.....	42
2.1.3 Сонячні кути.....	45
2.2 Модель положення Сонця.....	49
2.3 Інтенсивність сонячного випромінювання та її модель	52
2.4 Існуючі метеорологічні моделі.....	56
2.5 Метеорологічна модель для неба з хмарами.....	62
2.6 Існуючі моделі СФП.....	65
2.7 Модель СФУ.....	72
Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3 Ідентифікація стану атмосфери та керування генерацією в сонячних фотоелектричних системах.....	79
3.1 Аналіз факторів, які впливають на генеровану потужність.....	79
3.1.1 Просторово-часова орієнтація світлочутливої поверхні СФП.....	79
3.1.2 Пошук точки максимальної потужності СФП.....	85

3.2	Методи розпізнавання хмарності та її вплив на генерацію енергії.....	93
3.2.1	Спектральний аналіз потужності сонячної генерації для визначення рівня хмарності.....	96
3.2.2	Визначення рівня хмарності на основі статистичного аналізу потужності.....	103
3.3	Класифікація хмарності.....	105
3.4	Обґрунтування вибору оптимального значення кута азимута СФП при екстремальному слідкуванні за Сонцем.....	109
3.5	Обґрунтування порогових значень інформаційного критерію класифікації хмарності для адаптивної зміни режимів керування положенням СФП.....	112
3.6	Алгоритм визначення станів хмарності за ковзним коефіцієнтом варіації потужності СФП.....	115
	Висновки до розділу 3.....	116
	РОЗДІЛ 4 Розробка та експериментальні дослідження системи керування автономними малопотужними фотоелектричними установками.....	119
4.1	Конструкція СФУ.....	119
4.2	Апаратна структура системи керування СФУ.....	123
4.3	Механічна система позиціювання СФП у просторі.....	125
4.4	Програмний застосунок для моніторингу параметрів СФУ.....	131
4.4.1	Методика вимірювання температури СФП.....	132
4.4.2	Методика вимірювання напруги, яку виробляє СФП.....	135
4.4.3	Методика вимірювання струму, який споживає навантаження.....	137
4.4.4	Розрахунок похибок вимірювання напруги і струму.....	139
4.5	Синтез системи керування.....	141
4.6	Моделювання та експериментальні дослідження.....	144
4.7	Перевірка на адекватність розробленої моделі СФУ.....	153
4.8	Економічний підхід оцінки ефективності роботи СФУ. Критерій ефективності роботи СФУ.....	156
4.9	Реалізація алгоритму пошуку MPP.....	160

Висновки до розділу 4.....	163
ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	170
ДОДАТОК А.....	178
ДОДАТОК Б.....	180
ДОДАТОК В.....	190

Перелік умовних скорочень

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

GCC - Global Cloud Composite

МК - мікроконтролер

MPP - Maximum Power Point

MPPT - Maximum Power Point Tracking

МСФУ - малопотужна сонячна фотоелектрична установка

ОП - операційний підсилювач

СФП - сонячний фотоелектричний перетворювач

СФУ - сонячна фотоелектрична установка

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Актуальність роботи

Після початку повномасштабної війни в Україні енергомережа зазнала значних ушкоджень і не може працювати в звичайному режимі. Для забезпечення споживачів електроенергією за таких умов застосовують графіки погодинних відключень або обмеження електропостачання. У зв'язку з зазначеним споживачі почали встановлювати власні генеруючі потужності для забезпечення своїх потреб. Серед альтернативних джерел енергії споживачі використовують сонячні електростанції. За матеріалами [1] кількість малих та великих сонячних електростанцій з початку повномасштабної війни збільшилась на 25%. Однак сонячні електростанції генерують енергію лише у сонячні дні та не завжди з повною віддачею. Оскільки Сонце підіймається на сході і сідає на заході, прямі промені Сонця на сході і на заході зовсім не потрапляють на світлочутливу поверхню СФП при направленні площини СФП на південь. Це призводить до зменшення генерованої потужності сонячними електростанціями. Таким чином, виникає науково-практичне завдання, що полягає у вдосконаленні методів експлуатації та підвищенні ефективності малопотужних фотоелектричних установок шляхом врахування кутової залежності інсоляції та впливу атмосферних чинників

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”. Результати досліджень у рамках цього проекту плануються до впровадження на базі об'єктів НТУ “Дніпровська політехніка”.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності малопотужних віддалених сонячних фотоелектричних установок шляхом розроблення алгоритму керування просторовим положенням СФП з урахуванням метеорологічних умов та співвідношення приросту згенерованої енергії до витрат на позиціонування.

Завданням дослідження є аналіз існуючих алгоритмів керування положенням у просторі СФП та створення ефективного алгоритму, який дозволить збільшити ефективність роботи існуючих малопотужних сонячних фотоелектричних установок.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування просторовим положенням сонячного фотоелектричного перетворювача автономної малопотужної фотоелектричної установки з урахуванням змінних метеорологічних умов.

Предметом дослідження є математичні й імітаційні моделі, методи та алгоритми автоматичного керування просторовим положенням СФП з урахуванням рівня хмарності та витрат енергії на позиціонування СФП у просторі.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі завдання:

1) проаналізувати фізичні, метеорологічні та технічні фактори, що впливають на енергоефективність роботи малопотужної сонячної фотоелектричної установки (МСФУ) та визначити ті, які найбільш суттєво впливають на ефективність перетворення сонячної енергії в електричну;

2) дослідити залежність вихідної потужності СФП від положення в просторі, інтенсивності освітлення та температури;

3) розробити імітаційну модель МСФУ, яка поєднує астрономічну модель, модель сонячного випромінювання з урахуванням хмарності та електричну модель СФП;

4) розробити адаптивний алгоритм керування положенням СФП у просторі, який перемикає режими пошуку залежно від класифікованого стану хмарності та забезпечує зростання корисної згенерованої енергії з урахуванням витрат на переміщення;

5) розробити програмно-апаратну систему адаптивного керування положенням СФП у просторі, яка враховує стан хмарності та переходить в оптимальний режим позиціонування;

б) провести економічні розрахунки ефективності роботи розробленої системи керування для підтвердження доцільності її впровадження.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано:

- 1) **Аналіз літератури:** пошук і огляд наукових статей, книг, документів та інших джерел для збирання інформації за темою дослідження.
- 2) **Спостереження:** систематичний аналіз та встановлення зв'язку залежності потужності, яка згенерована СФП, від кута падіння сонячних променів.
- 3) **Експеримент:** контрольований вплив на положення СФП у просторі для вивчення причинно-наслідкових зв'язків.
- 4) **Моделювання:** математичне й імітаційне моделювання для отримання статистичних даних та оцінки ефективності системи управління.
- 5) **Аналіз даних:** використання статистичних методів для обробки та інтерпретації числових даних, отриманих у ході дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Експериментально обґрунтовано умови, за яких у режимі переважання розсіяної складової сонячного випромінювання горизонтальне положення СФП забезпечує більшу генерацію електричної енергії порівняно з режимом постійного орієнтування площини СФП за нормаллю до напрямку на Сонце.

2. Удосконалено критерій оцінювання ефективності функціонування автономної малопотужної СФУ, який, на відміну від існуючих підходів оцінювання лише за валовою згенерованою енергією, враховує корисний приріст енергії, тобто з вирахуванням енергетичних витрат на пошук оптимального положення СФП, а також витрат, пов'язаних з технічним обслуговуванням системи.

3. Вперше обґрунтовано вибірковий коефіцієнт варіації потужності, яку генерує СФП, як інформаційний параметр для оцінки ступеня хмарності в системі адаптивного керування положенням СФП у просторі.

4. Набув подальшого розвитку метод керування просторовим положенням СФП за рахунок введення адаптивного перемикання режимів орієнтування за

розрахованим положенням Сонця, екстремального пошуку та горизонтального положення залежно від інформаційного критерію хмарності.

5. Набула подальшого розвитку імітаційна модель системи автоматичного керування положенням автономної малопотужної СФУ, у якій враховано зміну положення Сонця, хмарність, електричні параметри СФП, алгоритм позиціонування СФП у просторі та енергетичні витрати на його переміщення, що дає змогу порівнювати режими керування положенням СФП за згенерованою енергією.

6. Для відтворення змінних метеорологічних умов під час оцінювання ефективності алгоритмів керування положенням СФП в моделі системи керування використано погодинні значення ступеня хмарності, отримані з супутникових даних NASA, зокрема на основі продуктів Global Cloud Composite (GCC), що дозволило забезпечити адекватність моделі.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Ковзний вибірковий коефіцієнт варіації потужності СФП є інформативною ознакою стану хмарності, оскільки відображає відносну інтенсивність флуктуацій генерації та дає змогу розділяти режими керування положенням СФП у просторі в залежності від стану хмарності: у сонячну погоду він змінюється в діапазоні 0-0.01, в умовах змінної хмарності - в діапазоні зміни значень від 0.01 до 0.025 та в хмарну погоду - в діапазоні зміни значень від 0.025 до 0.8.

2. Залежність потужності СФП від ковзного коефіцієнта варіації потужності є зворотною та нелінійною, при цьому існує значення коефіцієнта варіації, що дорівнює 0.025, при якому потужність, що генерується СФП при екстремальному керуванні позиціонуванням, стає менше потужності, яка генерується СФП при його статичному горизонтальному положенні, що дозволяє сформулювати умову зміни тактики керування СФП в залежності від типу хмарності.

Практичне значення одержаних результатів.

У процесі розв'язання поставлених задач отримано такі практичні результати:

1. Запропоновано алгоритмічну реалізацію адаптивного керування положенням СФП, у якій режим позиціювання обирається за значенням ковзного коефіцієнта варіації потужності та поточним розрахунковим положенням Сонця.

2. Розроблено алгоритм перемикання режимів керування СФП, який залежно від стану хмарності визначає оптимальне положення СФП у просторі: у сонячну погоду та за умови незначної хмарності забезпечується екстремальне стеження за максимальною потужністю, за умови суцільної хмарності - переведення СФП у горизонтальне положення для використання розсіяної радіації.

3. Розроблено програмно-апаратний комплекс, який дозволяє провести оцінку миттєвої потужності, яку генерує СФП, та здійснює логування результатів у файл з прив'язкою до часових міток, що забезпечує можливість подальшого аналізу динаміки генерації, оцінювання статистичних характеристик (зокрема середнього значення, дисперсії та коефіцієнта варіації), а також порівняння ефективності різних алгоритмів керування в умовах змінних метеорологічних умов.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В публікації, написаній у співавторстві, здобувачеві належить дослідження методів пошуку точки максимальної потужності СФП.

Апробація результатів дисертації. Наукові результати та практичні розробки для дисертаційної роботи доповідались на наукових конференціях:

1. Зибалов Д.С. Моделювання алгоритму MPP в MATLAB. Молодь: наука та інновації: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 12–14 листопада 2025 року: у 3-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. Том 2. 378 с.;
2. Зибалов Д.С. Оптимізована методика розрахунку магнітного підсилювача з тороїдальним сердечником для регулювання напруги. Молодь: наука та інновації 2024 матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів,

аспірантів та молодих вчених / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

3. Зибалов Д.С. Метод вимірювання хвильового опору коаксіального дроту. 175 ст. «Наукова весна» 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

4. Зибалов Д.С. Протоколи обміну інформацією у системах інтернет речей «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 1–3 березня 2023 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

5. Зибалов Д.С. Методика побудови інформаційної системи інтернет речей. Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2022 – 572 с.

Основні наукові результати та практичні розробки дисертаційної роботи були опубліковані в журналах:

1. Д.С. Зибалов, “Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача”, Енергетика і автоматика, №5 2022 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>

2. Д.С. Зибалов, “Вимірювання опору за допомогою розбалансованого вимірювального моста Уітсона”, Енергетика і автоматика, №2, 2024р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya2\(72\).2024.162](https://doi.org/10.31548/energiya2(72).2024.162)

3. Д.С. Зибалов, К.В. Соснін, “Підвищення ефективності фотоелектричного перетворювача методом пошуку точки максимальної потужності”, Енергетика і автоматика, №5 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya5\(81\).2025.103](https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.103)

4. Д.С. Зибалов “Моделювання сонячного фотоелектричного перетворювача в спеціалізованому програмному середовищі MATLAB”, Енергетика і автоматика, №6 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya6\(82\).2025.100](https://doi.org/10.31548/energiya6(82).2025.100)

5. Д.С. Зибалов, “Вплив кута нахилу сонячного фотоелектричного перетворювача на генеровану потужність в умовах хмарності та статистичний критерій доцільності трекінгу”, Енергетика і автоматика, №2 2026 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 177 сторінок, 71 рисунок, 1 таблиця, список літератури та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1.

1.1 Аналіз наукових публікацій у сфері фотоелектричних систем.

Сонячний фотоелектричний перетворювач - це пристрій, який перетворює світлову енергію в електричну [1]. Основний принцип роботи полягає у використанні фотоелектричного ефекту, де фотони сонячного світла взаємодіють з напівпровідниковою структурою СФП і збуджують електрони, створюючи електричний струм. Отриманий струм може бути використаний для живлення побутових приладів або зберігатися в акумуляторах для подальшого використання. Найдешевші та найбільш поширені монокристалічні та полікристалічні кремневі СФП. У монокристалічних СФП світлочутливі пластини направлені в одну сторону, а у полікристалічних розташовані різнонаправлені кристали.

Для нормального функціонування сонячної фотоелектричної установки світло повинно падати за нормаллю до поверхні СФП. Це допомагає реалізувати трекер [2]. Трекер - це пристрій, який повертає СФП у просторі. Існуючі трекери повертають СФП так, щоб сонячні промені падали за нормаллю до поверхні. Трекери бувають двох типів. Перший тип трекерів повертає СФП в одній площині, а другий тип у двох площинах. Вони використовують алгоритм слідкування за потужністю, яку генерує СФП, чи за заздалегідь прорахованою траєкторією для конкретного місця та пори року, не враховуючи хмарність.

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється підвищенню ефективності перетворення сонячної енергії у фотоелектричних системах. У літературі широко досліджуються питання застосування малопотужних сонячних фотоелектричних установок для енергоживлення автономних об'єктів інфраструктури, таких як системи вуличного освітлення, камери відеоспостереження, дорожні сигнальні пристрої та інші віддалені споживачі електричної енергії. У більшості випадків такі системи працюють в автономному режимі та використовують акумуляторні батареї для накопичення енергії, що накладає додаткові вимоги до ефективності використання сонячної енергії. У роботі [3] розроблено систему автономного живлення вуличного освітлення на

основі СФП з контролером відстеження точки максимальної потужності. Описана система забезпечує ефективне заряджання акумуляторної батареї та стабільну роботу освітлювального обладнання, що підтверджує доцільність використання СФП у децентралізованих системах енергоживлення.

Подібні рішення набули широкого застосування для живлення автономних освітлювальних установок і дорожніх об'єктів [4]. Для більш ефективного використання автономні системи освітлення на основі СФП використовують датчик руху [5], який забезпечує ввімкнення освітлення лише в разі потреби.

Запропонований підхід дозволяє зменшити споживання електроенергії за рахунок ефективного керування навантаженням і тим самим підвищити загальну ефективність функціонування системи. Такий підхід свідчить про перехід від простих автономних рішень до інтелектуальних систем керування енергоспоживанням [6]. Такі рішення знаходять широке застосування для живлення дорожнього освітлення та сигнальних систем у віддалених районах [7].

Розглянуті вище рішення побудовані на загальних фізичних закономірностях перетворення сонячного випромінювання та не враховують вплив метеофакторів.

У роботі [8] запропоновано модель розподілу дифузного сонячного випромінювання на похилі поверхні.

Подальший розвиток фізичних моделей сонячного випромінювання представлено у підручнику [9], де наведено узагальнену теорію взаємодії сонячного випромінювання з атмосферою. У цьому джерелі вводиться поділ на пряму та розсіяну складові випромінювання, а також використовується індекс ясності для статистичного опису стану атмосфери. Значну увагу приділено геометрії сонячного випромінювання, включаючи визначення положення Сонця, розрахунок кута падіння променів на довільно орієнтовані поверхні та методи переходу від горизонтальної до похилої площини. Ці положення є критично важливими для моделювання роботи СФП і подальшого аналізу впливу кута нахилу в умовах змінної хмарності.

Проведений аналіз наукових публікацій показав, що значна частина робіт зосереджена на підвищенні енергетичної ефективності систем шляхом оптимізації

кута нахилу СФП та застосування систем автоматичного стеження за Сонцем. У більшості досліджень [10-12] доведено, що використання трекерних систем дозволяє збільшити виробіток електричної енергії порівняно зі стаціонарним розміщенням СФП.

У наукових працях [13-18] розглядається вплив метеорологічних умов на ефективність роботи фотоелектричних установок. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням хмарності суттєво зростає частка дифузної складової сонячного випромінювання. У статті [19] констатували очевидність впливу метеорологічних умов на генерацію електричної енергії фотоелектричними системами.

Результати робіт [19-26] показують, що оптимальний кут нахилу значною мірою залежить від географічної широти, пори року, а також від співвідношення між прямою та дифузною складовими сонячної радіації. Зі збільшенням частки дифузного випромінювання оптимальний кут нахилу поверхонь СФП зменшується [27], що пов'язано з більш рівномірним розподілом енергії по небесній півсфері.

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій галузі, аналіз літературних джерел показав, що в більшості робіт основна увага приділяється оптимізації роботи фотоелектричних систем за умов ясної або частково хмарної погоди.

Питання впливу значної хмарності на вибір оптимального просторового положення СФП досліджено недостатньо. Зокрема, у науковій літературі існують теоретичні дослідження, у яких комплексно аналізується доцільність використання альтернативних режимів орієнтації СФП в умовах переважання дифузної сонячної радіації. Однак відсутнє підтвердження зазначеного на практиці.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел свідчить про актуальність досліджень, спрямованих на розроблення методів та алгоритмів керування положенням СФП з урахуванням хмарності.

Розв'язання цієї задачі дозволить підвищити ефективність функціонування малопотужних сонячних фотоелектричних установок, особливо у випадках їх

використання для енергозабезпечення автономних об'єктів у змінних погодних умовах.

1.2 Класифікація та огляд сонячних фотоелектричних установок

Сонячні фотоелектричні установки - це системи, які перетворюють сонячну енергію на електричну за допомогою СФП. Ці установки використовуються для забезпечення електроенергією широкого кола споживачів.

Класифікація СФУ проводиться за такими параметрами [28]: за місцем розташування, за типом сонячних модулів, за способом монтажу, за масштабом.

За місцем розташування виділяються такі різновиди: наземні сонячні електростанції, дахові сонячні електростанції (розташовуються на плоских, скатних і інших типах дахів), фасадні сонячні електростанції, вбудовані сонячні електростанції (Building-Integrated Photovoltaics, BIPV), сонячні навіси і парковки, плавучі сонячні електростанції, мобільні (переносні) сонячні електростанції.

Серед зазначених вище аспектів можна виділити BIPV сонячні електростанції. Системи BIPV - це сонячні електростанції, в яких фоточутливі модулі використовують у вигляді фасадного матеріалу.



Рис. 1.1 Сонячна BIPV електростанція в м. Київ

Сонячна електростанція зображена на рис. 1.1. Знаходиться в місті Києві за адресою: вул. Миколи Бажана, 16. Робоча потужність системи 225 кВт. Такі системи, крім свого безпосереднього призначення, також виконують функції конструктивних елементів будівлі, доповнюючи або повністю замінюючи фасадні і покрівельні конструкції. За наявними тенденціями розвитку BIPV-рішення будуть найбільш активно розвиватися порівняно з іншими видами сонячних електростанцій, хоча коефіцієнт корисної дії таких електростанцій набагато нижчий, ніж у електростанцій іншого типу за рахунок неможливості правильно спозиціювати СФП у просторі відносно Сонця.

За типом сонячних модулів СФП бувають кремневі та плівкові. Кремневі СФП поділяються на монокристалічні, полікристалічні та аморфні.

Монокристалічні СФП складаються з тоненьких пластинок монокристалів, одержаних методом вирощування з чистого кремнію. Ці СФП найефективніші та мають коефіцієнт корисної дії 22% і в хмарну погоду є більш ефективними за СФП інших типів.

Полікристалічні (мультикристалічні) СФП виготовляються з використанням кристалічного кремнію, але процес виробництва відрізняється від процесу виготовлення монокристалічних СФП. За технологією кремній доводять до стану кипіння, а потім охолоджують. У результаті утворюється неоднорідний шар. Коефіцієнт корисної дії таких СФП складає до 18%.

Аморфні СФП (тонкі плівки) відрізняються від традиційних кристалічних СФП, оскільки використовують тонкі шари напівпровідникового матеріалу, а не товсті кристали. Спочатку на скляну або іншу підкладку наносять тонкий шар напівпровідникового матеріалу. Цей матеріал зазвичай представляє собою сплав з атомами кремнію, який потім охолоджують. При цьому утворюється некристалічна структура. Далі на поверхню аморфного напівпровідникового шару наносяться контактні електроди. Основною перевагою аморфних сонячних елементів є мала вага конструкції, що робить їх ідеальними для використання в фотоелектричних системах для мобільних пристроїв. Однак, такі сонячні елементи, порівняно з кристалічними СФП, мають нижчий коефіцієнт корисної

дії (до 12%), тому їх використання зазвичай обмежене застосуванням у разі, коли вага та гнучкість важливіше за виробництво максимальної потужності.

Плівкові СФП у порівнянні з кремнієвими СФП мають маленьку вагу та компактний розмір. В плівкових СФП світлочутливий шар наноситься на поверхню гнучкої пластини. Він покривається сіткою електродів та зовнішнім захисним шаром. Замість кремнію в плівкових СФП використовують телурид кадмію чи галій. Коефіцієнт корисної дії таких СФП складає до 11% для СФП, які використовують телурид кадмію, та 20% для тих, що використовують галій.

За способом монтажу СФУ бувають наземної установки, вбудовані в дах та плавучі. Наземні СФУ розміщуються на спеціальних стійках або рамках на земельній ділянці або на відкритому просторі, рис. 1.2.



Рис. 1.2 СФП розміщені на спеціальних стійках на земельній ділянці

Вбудовані СФУ встановлюють на даху будівлі. Плавучі СФУ використовуються на водоймах або в морських об'єктах.

За масштабом СФУ бувають побутові, комерційні та сонячні ферми. Побутові сонячні системи призначені для житлових будівель та маленьких комерційних об'єктів та мають невелику потужність. Встановлюються для генерації енергії з метою задоволення потреб домогосподарства. У свою чергу

комерційні СФУ встановлюються на великих промислових або комерційних будівлях, заводах та установках. Такі СФУ мають велику потужність та генерують енергію для власних потреб, а надлишок продають іншим споживачам. Сонячні ферми розташовують на великих земельних ділянках і використовують для генерації електроенергії в мережу.

1.3 Аналіз ефективності використання СФУ на території України

Завдяки своєму географічному розташуванню Україна має значний потенціал для ефективної генерації сонячної енергії. Південні регіони мають більше 200 днів сонячного світла на рік на відміну від іншої території України. На рисунку 1.3 наведено дані метеоархіву NASA для міста Дніпра за 2025 рік.

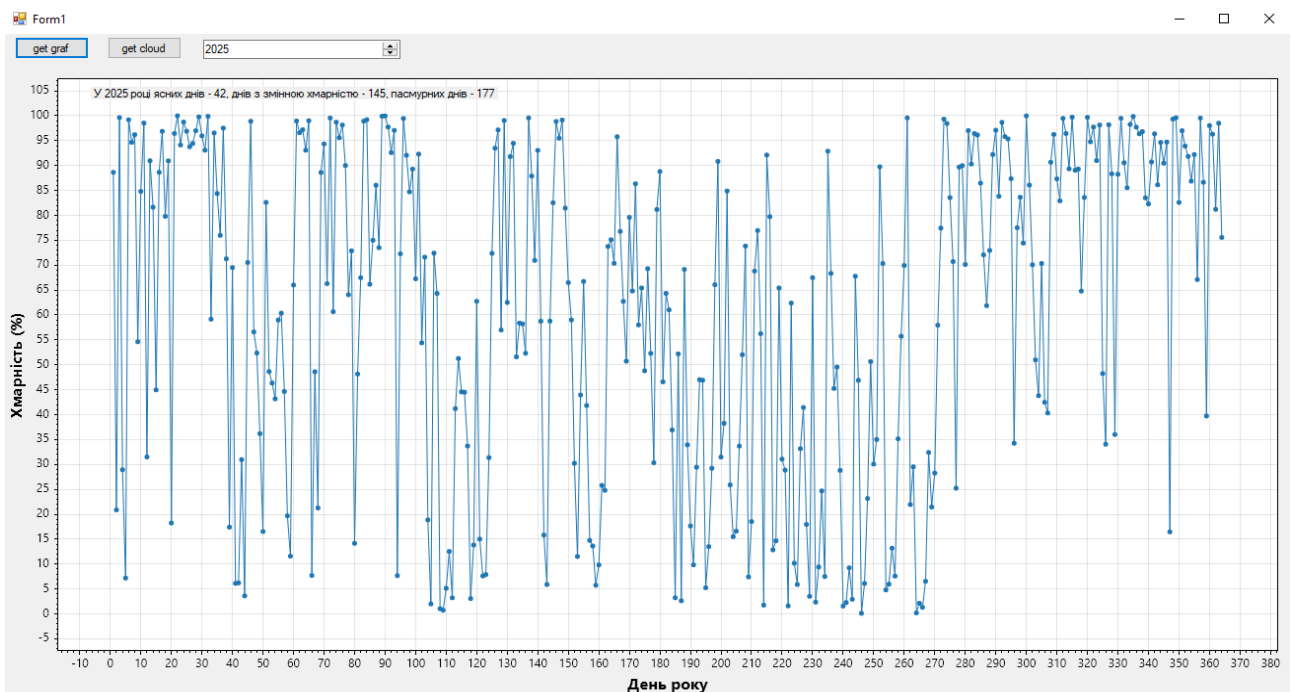


Рис. 1.3 Аналіз щоденної хмарності та сонячної радіації в м. Дніпрі за 2025 рік

Для аналізу щоденної хмарності та сонячної радіації в місті Дніпрі за 2025 рік були використані дані з сервісу NASA POWER Data Access Viewer [29].

Реаналізаційні дані є результатом чисельного відтворення погодних умов на основі комбінованих спостережень з метеостанцій, супутників та радіозондів. Використання цих даних дозволяє отримати однорідний і повний архів погодних параметрів навіть у тих точках, де прямі вимірювання відсутні. При аналізі цих

даних було встановлено, що у місті Дніпрі дуже багато хмарних днів, що призводить до зменшення генерації електроенергії СФП. Цей фактор треба враховувати при проєктуванні СФУ в місті Дніпрі.

Економічна доцільність використання СФУ в Україні є високою [30] у зв'язку з частими відключеннями електропостачання через ворожі атаки інфраструктури електричних мереж та з урахуванням високих тарифів на електроенергію. Ефективність СФУ в Україні визначається географічними та кліматичними умовами. Середньорічна інсоляція в південних областях країни сягає 1400 кВт·год/м² на рік, у центральних - 1200 кВт·год/м², а на півночі та заході - близько 900–1000 кВт·год/м². Таким чином, СФУ на півдні та у центрі країни здатні виробляти на 20-30% більше електроенергії, ніж на заході та півночі України. Крім того, погодні умови можуть знижувати ефективність генерації сонячної енергії.

СФУ використовуються як у вигляді малих автономних станцій, так і великих електростанцій та забезпечують енергією під час відключень електропостачання роботу лікарень, навчальних закладів, складів гуманітарної допомоги, пунктів зв'язку та сигналізації. У південних областях України військові та волонтерські організації використовують модульні СФУ потужністю до 5 кВт для безперервного живлення блокпостів та медичних пунктів. Мобільні сонячні системи дозволяють швидко розгорнути автономне електропостачання у зоні бойових дій, що суттєво підвищує енергетичну гнучкість.

Бойові дії підвищують ризик пошкоджень обладнання, оскільки СФУ займають велику площу та можуть бути легко помічені з повітря. При ураженні СФП або контролерів відновлення системи може займати до 5 днів. Крім того, технічне обслуговування та захист від крадіжок залишаються критично важливими аспектами для підтримки безперервної роботи СФУ.

Таким чином, аналіз показує [31], що СФУ є ефективним і гнучким джерелом енергії для автономного електропостачання в Україні. Їх використання дозволяє значно знизити залежність від дизельних генераторів та електромережі, швидко розгорнути мобільні станції та забезпечувати критичні об'єкти електроенергією,

проте, їх ефективність залежить від географічних, кліматичних та організаційних факторів.

1.4 Малопотужні сонячні фотоелектричні установки

У цій роботі розглядаються малопотужні сонячні фотоелектричні установки, які призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію та її подальшого використання споживачами з низьким енергоспоживанням. Такі МСФУ використовуються у віддалених місцях, де відсутня можливість під'єднання до електромережі для живлення систем освітлення, відеоспостереження, моніторингу довкілля, збору даних, інтернет речей (IoT) та інших малопотужних споживачів.

До складу таких установок входить СФП, система керування положенням СФП, блок накопичення енергії (акумулятор або іоністор) та навантаження.

Джерелом енергії для МСФУ є СФП. Принцип роботи СФП базується на фотоелектричному ефекті у напівпровідниковому матеріалі сонячного елемента, внаслідок якого енергія фотонів перетворюється на електричну [32]. Виникаюча електрорушійна сила забезпечує потік електронів через зовнішнє навантаження. Ефективність цього процесу визначається спектральним складом сонячного випромінювання, температурою елемента, параметрами матеріалу р–n переходу, а також умовами освітлення.

Робочі умови МСФУ є надзвичайно складними, оскільки МСФУ знаходяться у віддалених або малодоступних місцях. Система повинна працювати без постійного контролю чи обслуговування протягом тривалого часу, зберігаючи стабільність вихідних параметрів у широкому діапазоні зовнішніх умов. Вона повинна ефективно функціонувати за умови змінної інсоляції, коливань температури, вологості та інших атмосферних факторах, забезпечуючи надійне живлення споживачів з мінімальними втратами енергії. У зв'язку з цим до МСФУ висуваються підвищені вимоги щодо автономності, енергоефективності та стійкості компонентів до деградації. Найвразливішим місцем МСФУ є механічна частина, тому для тривалішого безперебійного функціонування МСФУ треба

оптимізувати алгоритми керування положенням СФП таким чином, щоб траєкторія руху була найменша.

До основних функціональних вимог, що висуваються до МСФУ, належать висока стабільність вихідних параметрів у широкому діапазоні освітленості, низькі втрати енергії під час перетворення, здатність до ефективної роботи за змінної температури, мінімальне власне енергоспоживання системи керування, а також сумісність з низьковольтними пристроями. З огляду на це, ключовим завданням є забезпечення максимальної ефективності перетворення при мінімальних габаритах і вартості системи.

Специфіка керування малопотужними сонячними фотоелектричними установками полягає в необхідності постійного пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP) [33, 34] та оптимального положення площини СФП, що змінюється залежно від положення Сонця та метеоумов за допомогою трекерної системи [35]. У цій роботі планується дослідити та оптимізувати алгоритми керування положенням СФП у просторі відносно Сонця та підвищити ефективність роботи алгоритму пошуку MPP.

На основі аналізу вищевказаних наукових джерел встановлено, що малопотужні фотоелектричні установки здатні функціонувати при освітленості від 200 до 1000 Вт/м². На рисунку 1.4 показано графік зміни потужності в хмарну погоду СФП потужністю 290 Вт. Дані були отримані з власної сонячної електростанції.

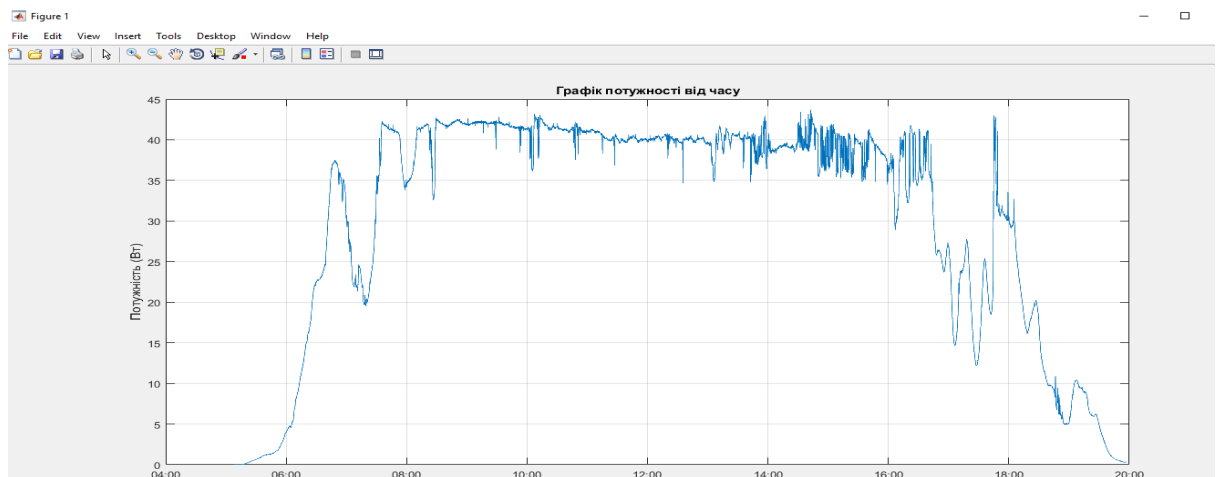


Рис. 1.4 Графік зміни потужності у хмарну погоду

Отже, встановлено, що МСФУ можуть бути перспективним рішенням для автономного електроживлення споживачів у сфері малої енергетики за умови адаптивного керування положенням СФП і відбором потужності. Ефективна робота МСФУ потребує застосування методів керування, здатних оперативно реагувати на зміни освітленості та температури. Висока стабільність, простота конструкції та енергоефективність роблять МСФУ ключовим елементом сучасних енергоінтелектуальних систем і важливим напрямом подальших наукових досліджень у галузі відновлюваних джерел енергії.

1.5 Аналіз способів підвищення ефективності роботи СФУ

На даний час існує багато різних способів підвищення ефективності роботи СФУ. Джерелом енергії для СФУ є СФП, на ефективність роботи якого впливають такі фактори:

- 1) інтенсивність світлового потоку;
- 2) кут падіння світлового потоку;
- 3) запиленість;
- 4) погодні умови;
- 5) температура;
- 6) деградація СФП внаслідок старіння;
- 7) пошук точки максимальної потужності.

З перелічених факторів не вирішено однозначно питання підтримання оптимального кута падіння сонячних променів на поверхню СФП за різних погодних умов. Концентрувати сонячні промені на поверхні СФП можливо за допомогою оптичних методів та за допомогою механічного рішення у вигляді системи позиціонування СФП у просторі відносно Сонця. Такий пристрій називається трекером.

Трекери відрізняються своєю конструкцією [36] та методами управління. Існує два конструктивних варіанта позиціонування СФП. Перший варіант трекера повертає СФП в одній площині, а другий тип повертає СФП у двох площинах. Сучасні трекери для ефективного позиціонування СФП у просторі використовують екстремально-пошуковий алгоритм слідкування [37-38], чи астрономічний

алгоритм за заздалегідь прорахованою траєкторією [39-40] для конкретного місця та пори року, не враховуючи хмарність.

1.6 Постановка задачі дослідження

Сонячна енергія є одним з найперспективніших джерел відновлюваної енергії та має невичерпний потенціал. Інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі може досягати 1 кВт/м^2 , однак фактична кількість енергії, що може бути перетворена в корисну електричну, істотно залежить від географічного положення, часу доби, пори року та поточних метеорологічних умов. Сонячні промені, які досягають поверхні Землі, поділяються на прямі та розсіяні. Найвища ефективність перетворення сонячної енергії досягається за умови перпендикулярного падіння променів на поверхню СФП. Водночас більшість СФП у малопотужних фотоелектричних системах встановлюються у фіксованому положенні, що не дозволяє забезпечити оптимальне орієнтування відносно Сонця протягом усього світлового дня. Це зумовлює втрату частини енергії, оскільки кут між площиною СФП та напрямком сонячного випромінювання змінюється впродовж дня.

Існуючі трекерні системи сонячного стеження здатні змінювати орієнтацію СФП відповідно до положення Сонця. Вони працюють за детермінованими законами руху, не враховуючи поточний стан навколишнього середовища. Наявність хмарності, запиленості, тіней від перешкод, коливань температури або зміни інтенсивності випромінювання призводить до того, що фіксоване стеження за траєкторією Сонця не завжди забезпечує максимальну генерацію потужності. Враховуючи ці фактори, актуальним є створення системи керування, здатної змінювати положення СФП в просторі залежно від поточних зовнішніх умов, забезпечуючи тим самим оптимальну орієнтацію за нормаллю до променів Сонця для досягнення максимальної енергетичної ефективності. Для досягнення цієї мети необхідно розробити систему, здатну аналізувати змінні параметри і на основі цього формувати рішення щодо положення СФП у просторі. Таким чином, постає наукова задача розроблення системи керування положенням СФП, яка на основі аналізу зовнішніх умов забезпечуватиме підтримання ефективного режиму

роботи МСФУ. Система повинна ідентифікувати зміну інтенсивності випромінювання, визначати характер впливу погодних факторів, оцінювати ситуації, у яких доцільно перейти від екстремального стеження за Сонцем до стабілізованого положення, та коригувати орієнтацію СФП для досягнення максимальної потужності.

Для розв'язання цієї наукової задачі необхідно виконати основні задачі:

- 1) провести аналітичний огляд існуючих методів керування СФУ, визначити їхні переваги та обмеження;
- 2) дослідити вплив зовнішніх чинників (кут падіння променів, температура, хмарність, запиленість, тіні) на вихідну потужність СФП;
- 3) побудувати математичну модель системи сонячного стеження, що відображає взаємозв'язки між параметрами освітлення, положенням СФП у просторі та її вихідними характеристиками;
- 4) розробити алгоритм керування;
- 5) інтегрувати алгоритм Maximum Power Point Tracking (MPPT) у систему керування для забезпечення постійного пошуку робочої точки максимальної потужності;
- 6) провести моделювання роботи запропонованої системи в різних умовах освітлення, оцінити її стабільність, швидкодію та точність;
- 7) розробити рекомендації щодо реалізації запропонованої системи у вигляді апаратно-програмного комплексу для малопотужних автономних СФУ.

Виконання поставлених задач дозволить створити експертну систему, яка забезпечить інтелектуальне керування орієнтацією СФП у просторі з урахуванням реальних погодних умов. Це сприятиме підвищенню ефективності перетворення сонячної енергії в електричну та зменшить навантаження на рухомі частини трекера, що приведе до збільшення часу безвідмовної роботи МСФУ.

Розроблена система керування положенням СФП повинна мати можливість розпізнавати зміну інтенсивності сонячного випромінювання, визначати характер впливу погодних факторів (наприклад, наявність хмарності чи тіней) та

відповідно до цього коригувати положення СФП для досягнення максимальної потужності.

Таким чином, постає наукова задача розроблення інтелектуальної системи керування МСФУ, яка на основі аналізу зовнішніх умов забезпечуватиме підтримання ефективного режиму роботи МСФУ з урахуванням роботи алгоритму максимального відстеження потужності (МРР).

Висновки до розділу 1

У віддалених місцях, де підключення до централізованих енергетичних мереж є технічно складним або економічно невиправданим, МСФУ забезпечують автономне електроживлення метеостанцій, телекомунікаційного обладнання, освітлення трас та інших малопотужних споживачів без потреби у традиційних джерелах енергії. Завдяки високій надійності, мінімальним експлуатаційним витратам та екологічній безпечності, такі системи є ефективним рішенням для енергозабезпечення у важкодоступних регіонах, де інші види енергопостачання або відсутні, або потребують значних капіталовкладень.

При аналізі літературних джерел було встановлено:

- 1) сонячні промені можуть бути прямими та розсіяними, на поверхні Землі щільність сонячних променів може становити 1000 Вт/м^2 ;
- 2) найбільш ефективна робота СФП відбувається при повному освітленні поверхні СФП і перпендикулярному падінні сонячних променів на поверхню СФП;
- 3) СФП встановлюються у фіксованому положенні, що не дозволяє слідувати за Сонцем та працювати з повною віддачею протягом усього дня;
- 4) на ефективність роботи СФП впливає інтенсивність світлового потоку, запиленість, погодні умови, температура, кут падіння світлового потоку, оптимальний відбір енергії, тип фотоелементів;
- 5) встановлено, що в 2025 році було 177 хмарних днів та 145 з змінною хмарністю на території м. Дніпра.

Таким чином, для підвищення ефективності роботи МСФУ, в якій є можливість зміни положення СФП в просторі, потрібно дослідити залежність

потужності на виході СФП від положення СФП у просторі для різних сполучень перелічених вище факторів з метою визначення для кожного сполучення оптимальної траєкторії переміщення СФП в просторі. Вирішення означених наукових задач дозволить підвищити ефективність роботи СФП за рахунок розпізнавання погодних умов для забезпечення оптимального положення СФП у просторі.

Математичне моделювання процесів перетворення енергії є необхідним етапом при розробці та оптимізації фотоелектричних систем, оскільки дозволяє врахувати вплив зовнішніх факторів і визначити оптимальні параметри роботи МСФУ.

РОЗДІЛ 2

Фізико-математичне моделювання процесів сонячного випромінювання та фотоперетворення енергії

Для розробки математичної моделі СФУ необхідно визначити положення Сонця за допомогою астрономічної моделі та на основі отриманих даних, з метою визначення інтенсивності випромінювання з урахуванням атмосферного поглинання та розсіювання, розрахувати іррадіацію за допомогою моделі чистого неба. Для врахування реальних погодних умов отримані показники іррадіації коригуються за допомогою моделі хмарності на основі супутникових даних NASA. Отримані значення іррадіації використовуються для розрахунку генерованої потужності за допомогою моделі СФП.

2.1 Природа сонячного випромінювання

Сонячне випромінювання складається з електромагнітного та корпускулярного випромінювання, що утворюється в результаті термоядерних реакцій у центральній частині Сонця внаслідок протон-протонного циклу синтезу водню в гелій. Випромінювання характеризується широким спектральним складом, максимум якого припадає на видиму частину спектра (400–700 нм). Протягом року Сонце випромінює $5,4 \cdot 10^{24}$ Дж енергії. Ця енергія поширюється в просторі у вигляді електромагнітного випромінювання, частина якого досягає Землі. Максимальна інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі становить близько 1300 Вт/м^2 . Інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі змінюється залежно від географічної широти, пори року, кута падіння променів та атмосферних умов.

2.1.1 Рух Землі навколо Сонця

Земля рухається навколо Сонця по еліптичній траєкторії з малим ексцентриситетом [34]. Траєкторію руху Землі навколо Сонця приведено на рисунку 2.1. Рух по еліптичній орбіті призводить до того, що відстань від Землі до Сонця змінюється протягом року. Найбільша відстань (афелій) становить $152 \cdot 10^6$ км, а найменша (перигелій) - $49,6 \cdot 10^6$ км. Ексцентриситет сучасної земної орбіти становить 0,0167. Орбітальна швидкість планети складає 30 км/с. Період повного

обертання навколо Сонця 365,24 доби. Нахил осі обертання Землі відносно площини орбіти (екліптики) становить $23,45^\circ$. Такий нахил визначає зміну кута падіння сонячних променів протягом року, що зумовлює чергування сезонів. Добові та сезонні коливання інсоляції зумовлені комбінацією нахилу осі та положення Землі на орбіті [35]. У літнє сонцестояння промені Сонця падають на поверхню Землі майже під прямим кутом, що призводить до максимальної інтенсивності випромінювання.

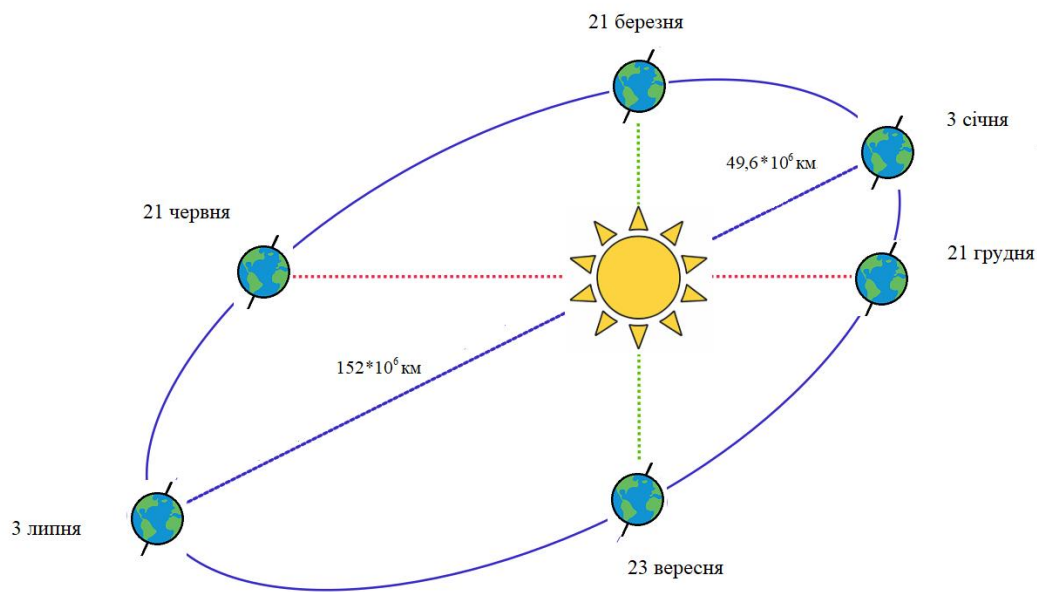


Рис. 2.1 Положення Землі відносно Сонця

У зимове сонцестояння кут падіння променів є мінімальним, внаслідок чого відбувається зменшення інсоляції за рахунок розсіювання сонячних променів у атмосфері, які долають довший шлях ніж при літньому сонцестоянні. Зміна висоти Сонця над горизонтом та тривалість дня призводить до просторово-часового розподілення сонячної енергії на поверхні планети. Зміна відстані від Землі до Сонця, нахил осі та обертання планети навколо своєї осі формує циклічні коливання інсоляції [36].

Річний рух Землі визначає добові зміни висоти Сонця та тривалості дня. Обертання Землі навколо власної осі відповідає за чергування дня і ночі. Для оцінки інтенсивності сонячного випромінювання в конкретному регіоні ключове

значення має геометрія орбітального руху [37]. Це дозволяє точно розраховувати кут падіння сонячних променів. Наближено кут схилення Землі в будь-який день року можна розрахувати за формулою 2.1.

$$\delta = \delta_0 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + N)\right), \quad (2.1)$$

де δ - деклінація Сонця в градусах, N - порядковий день року, число 284 - це зміщення для вирівнювання з весняним рівноденням. Графік зміни сонячної деклінації протягом дня приведено на рисунку 2.2.

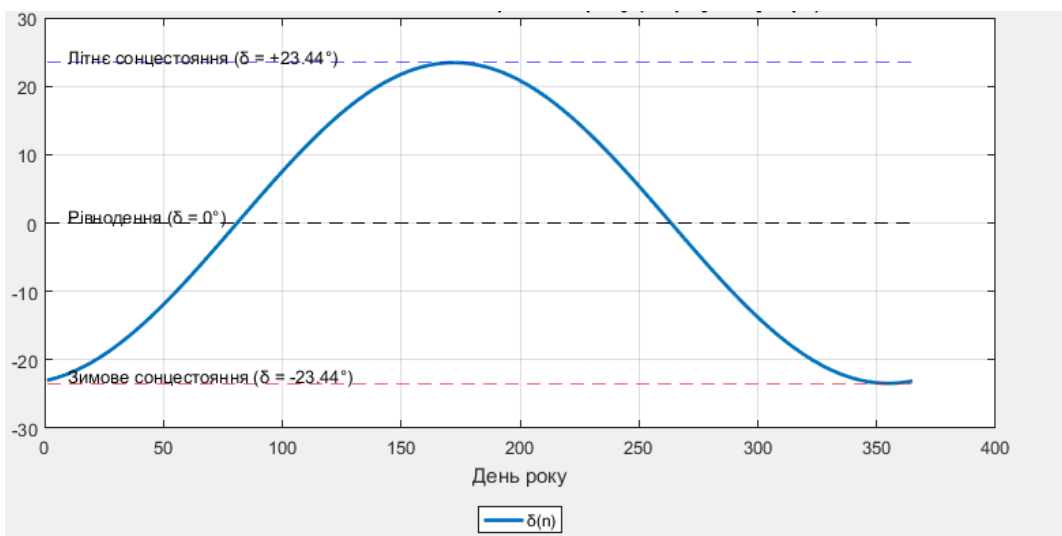


Рис. 2.2 Зміна сонячної деклінації протягом року

2.1.2 Справжній сонячний час

Справжній сонячний час (TST, True Solar Time) визначається видимим годинним кутом Сонця [38] відносно місцевого меридіана. О 12 годині сонячного часу Сонце проходить перетин локального меридіана (верхня кульмінація). На відміну від середнього сонячного часу, справжня сонячна доба не є сталою величиною, оскільки орбітальний рух Землі здійснюється по еліптичній орбіті, а вісь обертання нахилена відносно площини орбіти. Через ці причини істинна тривалість дня змінюється протягом року, що спричиняє зміну різниці між справжнім і середнім сонячним часом. Ця різниця називається рівнянням часу [39]. Максимальне відхилення становить приблизно 16 хвилин. Справжній сонячний час залежить від географічної довготи [40]. На східних довготах

полудень настає раніше ніж на західних від вибраного меридіана. Справжній сонячний час використовується в астрономії, геодезії та в розрахунках орієнтації СФП, тоді як у повсякденному житті застосовується поясний або середній сонячний час.

Справжній сонячний час T_{ST} зв'язаний з середнім місцевим сонячним часом T_{MST} через рівняння часу $E(t)$ так:

$$T_{ST} = T_{MST} + \frac{E(t)}{60} \quad (2.2)$$

Середній місцевий сонячний час можна обчислити з середнього часу на меридіані відліку за формулою 2.3.

$$T_{MST} = T_{UTC} + \frac{\lambda}{15}, \quad (2.3)$$

де T_{UTC} - часовий час, λ - довгота у градусах. Якщо підставити формулу 2.3 у 2.2, то отримаємо повну формулу справжнього сонячного часу 2.4.

$$T_{ST} = T_{UTC} + \frac{4 * \lambda + E(t)}{60} \quad (2.4)$$

Теоретична форма рівняння часу розраховується як різниця в кутових координатах між середнім Сонцем й істинним, формула 2.5.

$$E_d = L_{mean} - \alpha, \quad (2.5)$$

де L_{mean} - середня довгота сонця, α - видима прямовисна (right ascension) Сонця. Рівняння часу може бути подане у вигляді гармонічної апроксимації декількома членами ряду Фур'є [41,42], що враховує домінуючі періодичні складові, зумовлені ексцентриситетом орбіти Землі та нахилом її осі обертання. У першому наближенні його значення у хвилинах часу за формулою 2.6.

$$E_t = 9.87 * \sin(2 * b) - 7.53 * \cos b - 1.5 * \sin b, \quad (2.6)$$

де фазовий аргумент $b = \frac{2 * \pi * (n - 81)}{365}$. Наведена апроксимація відображає сумарний вплив однорічної та піврічної періодик, що є наслідком нерівномірної кутової швидкості видимого руху Сонця та проєкційних ефектів, зв'язаних з нахилом екліптики. Для високоточних обчислень використовуються повніші ряди та астрономічні ефемериди [43], однак, ця апроксимація забезпечує достатню

точність для використання в задачах моделювання систем орієнтації сонячних фотогальванічних систем. Порівняння графіків залежності рівняння часу від номера дня в році для апроксимацій гармонічної та NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Національне управління океанічних та атмосферних досліджень США) приведено на рисунку 2.3.

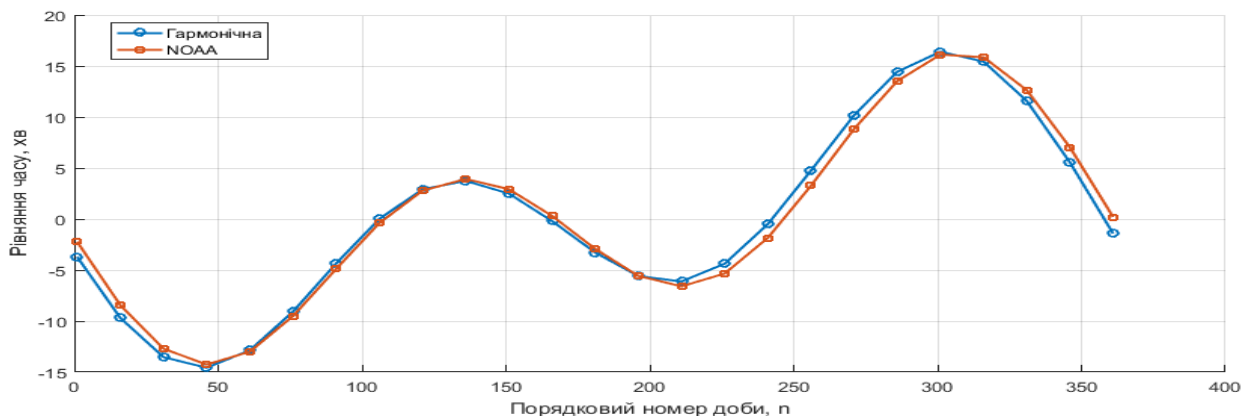


Рис. 2.3 Графіки залежності рівняння часу від номера дня в році для гармонічної та NOAA апроксимацій

NOAA апроксимація реалізує більш повний ряд Фур'є, точно апроксимований до реального руху Землі та сучасних ефемерид, тому забезпечує точність на рівні секунд для більшості діб. Порівняння гармонічної та NOAA апроксимацій рівняння часу приведено на рисунку 2.4.

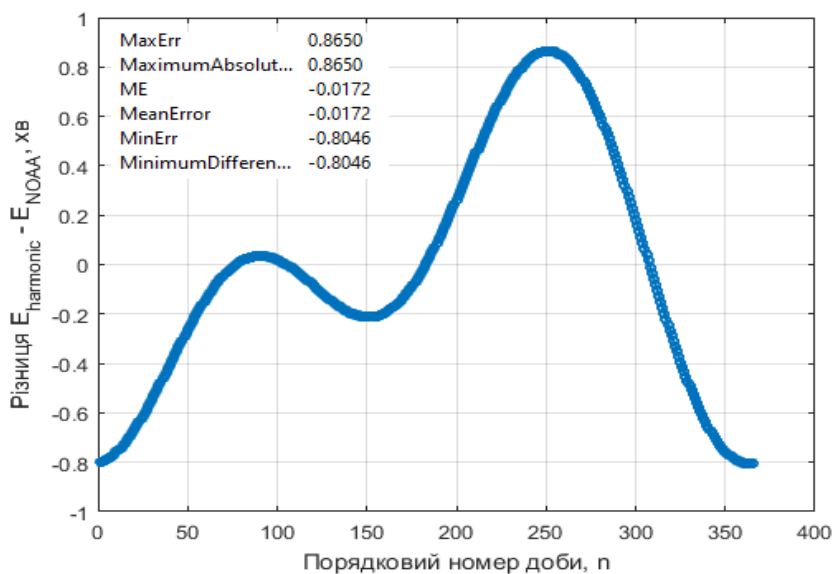


Рис. 2.4 Порівняння гармонічної та NOAA апроксимацій рівняння часу

У результаті порівняння двох апроксимацій рівняння часу встановлено, що проста гармонічна формула дає досить близькі результати до більш точної NOAA-апроксимації, однак, відхилення залежать від пори року. Значення середньої помилки (MeanError) наближено до нуля, що свідчить про відсутність систематичного зсуву. Корінь середньоквадратичної помилки (RMSE) складає 0.7хв, максимальна абсолютна помилка 2.5хв. Гармонічна апроксимація забезпечує достатню точність для більшості інженерних розрахунків, коли похибка в межах декількох хвилин допустима.

2.1.3 Сонячні кути

Для розробки моделі положення Сонця треба описати траєкторію руху Сонця по небосхилу залежно від пори року та поточного часу [44-47]. Для цього треба визначити астрономічні та геометричні параметри, що задають положення Сонця в будь-який момент часу, а також встановити математичні зв'язки між ними. На рисунку 2.5 зображені основні кути, які використовуються для розрахунку положення та напрямку СФП на Сонце.

Азимутальний кут α - це кут у горизонтальній площині між напрямком на північ та проекцією напрямку на Сонце на цю площину. Азимут описує горизонтальне положення Сонця й використовується для орієнтації СФП. Азимут вимірюється за годинниковою стрілкою від істинної географічної півночі від 0° до 360° .

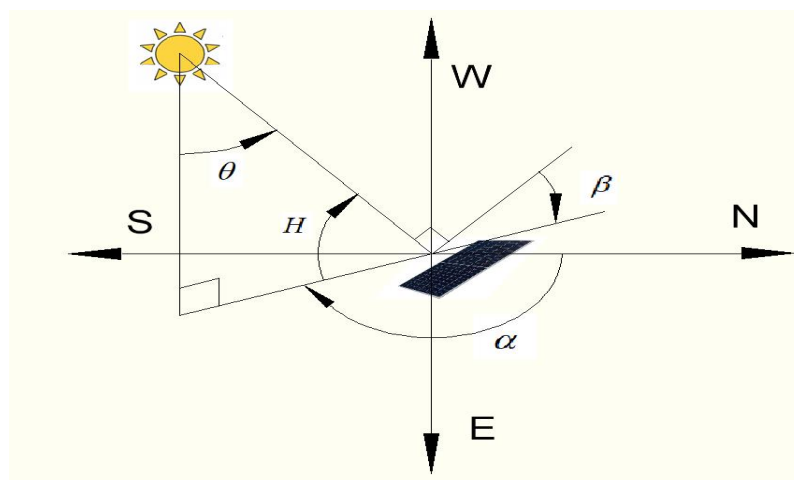


Рис. 2.5 Основні кути для знаходження положення та напрямку СФП на Сонце

Геометрично азимут можна уявити як кут у площині, що проходить через точку спостереження і є дотичною до поверхні Землі. У цій площині проводиться напрямок на географічну північ, який слугує нульовим відліком. Далі напрямок на об'єкт проєктується на площину. Кут між цими двома напрямками є азимутом.

У системах сонячної енергетики азимут використовується для задання напрямку повороту СФП у горизонтальній площині. Істинний азимут відлічується від географічної півночі, яка визначається напрямком на географічний Північний полюс. Магнітний азимут, у свою чергу, відлічується від напрямку магнітної півночі, яка може суттєво відхилитися від географічної. Для наукових та інженерних розрахунків завжди використовується істинний азимут, оскільки він є стабільною геометричною величиною, не пов'язаною з варіаціями магнітного поля Землі.

Зенітний кут θ - це кут між напрямком на Сонце та напрямком локальної вертикалі в точці спостереження. Фізичний зміст зенітного кута полягає в тому, що він визначає кут падіння сонячних променів на горизонтальну поверхню. Чим менший зенітний кут, тим ближче Сонце до зеніту і тим більш вертикально падає сонячне випромінювання.

Висота Сонця (Solar altitude, elevation angle) позначається літерою h та визначається як кут між напрямком на центр Сонця і горизонтальною площиною, вимірний у вертикальній площині, що проходить через Сонце та спостерігача.

Висота сонця дорівнює 0° , коли Сонце знаходиться на лінії горизонту, та 90° , коли Сонце в зеніті. Якщо Сонце знаходиться нижче горизонту, висота набуває від'ємних значень. З геометричної точки зору висота Сонця показує, наскільки високо над горизонтом знаходиться напрямок на Сонце. Саме ця величина визначає довжину тіні від вертикальних об'єктів і безпосередньо впливає на інтенсивність сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, оскільки, чим нижче буде Сонце, тим довший шлях промені будуть проходити через атмосферу, в якій частина енергії буде розсіюватись. Розрахувати висоту Сонця можна за формулою 2.7.

$$h = \arcsin(\sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos H), \quad (2.7)$$

де φ - географічна широта, для Дніпра $\varphi = 48.47^\circ$, δ - схилення сонця, H - годинний кут. Знайдемо схилення Сонця для 01 вересня (244 день з початку року), для цього підставимо значення $N = 244$ у формулу 2.1 та отримаємо $\delta = 23.45^\circ * \sin\left(\frac{360^\circ}{365} * (284 + 244)\right) = 8.02^\circ$.

Кут, на який Сонце змістилося відносно місцевого меридіана внаслідок обертання Землі, називається годинним кутом та розраховується за формулою 2.8.

$$H = 15^\circ * (T_{ST} - 12) \quad (2.8)$$

Щоб перейти від цивільного часу до сонячного (для міста Дніпра UTC+2) треба використати формулу 2.9.

$$\lambda_s = 15^\circ * (UTC + 2) = 15 * 2 = 30 \quad (2.9)$$

Сонячний час T_{ST} відображає позицію Сонця на небосхилі. У $T_{ST} = 12$ Сонце перебуває точно на місцевому меридіані. Розрахувати сонячний час можна за формулою 2.4, використавши формулу 2.6 рівняння часу та формулу допоміжного кута (фазового аргументу b). Для міста Дніпра з довготою $\lambda = 35.05^\circ$ східної довготи у 14:00 отримано такі результати:

- 1) допоміжний кут $b = \frac{360^\circ}{365} * (244 - 81) = 160.7^\circ$,
- 2) рівняння часу $E_t = 9.87 * \sin(2 * 160.7^\circ) - 7.53 * \cos 160.7^\circ - 1.5 * \sin 160.7^\circ = 1.1xв$,
- 3) сонячний час $T_{ST} = T_{UTC} + \frac{E}{60} + \frac{4 * (\lambda - \lambda_s)}{60} = 14 + \frac{1.1}{60} + \frac{4 * (35.05 - 30)}{60} = 14.355 год$,
- 4) годинний кут $H = 15^\circ * (14.355 - 12) = 35.33^\circ$,
- 5) $h = \arcsin(\sin 48.47^\circ * \sin 8.02^\circ + \cos 48.47^\circ * \cos 8.02^\circ * \cos 35.33^\circ) = 39.8^\circ$

Кут нахилу СФП (tilt angle, inclination angle) позначається літерою β та визначає орієнтацію площини СФП відносно горизонтальної площини в точці її встановлення. Кут нахилу СФП розташований між площиною СФП та площиною істинного горизонту, виміряний у вертикальній площині, перпендикулярній до лінії їх перетину. При $\beta = 0^\circ$ площина СФП знаходиться в горизонтальному положенні, а якщо $\beta = 90^\circ$, то у вертикальному. Фізичний зміст кута нахилу

полягає в тому, що він визначає просторову орієнтацію нормалі до площини СФП, а отже впливає на ефективність роботи СФП. Розрахувати кут нахилу СФП можна за формулою 2.10.

$$\beta = 90^\circ - H \quad (2.10)$$

Якщо підставити у формулу 2.10 висоту Сонця, яка була розрахована раніше, то отримаємо: $\beta = 90^\circ - 39.8 = 50.2^\circ$. Таким чином, СФП для максимально ефективної роботи першого вересня о 14:00 треба розташувати під кутом $\beta = 50.2^\circ$.

Значення азимутального кута можна розрахувати використавши формулу 2.11.

$$\alpha_0 = \arctan\left(\frac{\sin H}{\cos H * \sin \varphi - \tan \delta * \cos \varphi}\right) \quad (2.11)$$

Перед розрахунком треба врахувати, що якщо $\cos H * \sin \varphi - \tan \delta * \cos \varphi > 0$, то $\alpha = 180 - \alpha_0$, якщо $\cos H * \sin \varphi - \tan \delta * \cos \varphi < 0$, то до отриманого кута треба буде додати 180° , а якщо після цього кут буде від'ємний, то до нього треба буде додати 360° . Приклад розрахунку для міста Дніпра та дати 01 вересня та часу 14:00 приведено нижче:

$$1) \cos 39.8^\circ * \sin 48.47^\circ - \tan 3.27^\circ * \cos 48.47^\circ = 0.5362 > 0,$$

$$2) \arctan \alpha = \frac{\sin 39.8^\circ}{\cos 39.8^\circ * \sin 48.47^\circ - \tan 3.27^\circ * \cos 48.47^\circ} = 50.1,$$

$$3) \alpha = 180^\circ - 50.1^\circ = 129.9^\circ.$$

У ході розрахунку отримано просторове положення Сонця для міста Дніпра на 01 вересня в час 14:00. Для цього використано класичні співвідношення сферичної астрономії, що пов'язують географічну широту місця, схилення Сонця та його годинний кут з горизонтальними координатами світила.

Було визначено висоту Сонця над горизонтом, тобто кут між напрямком на Сонце й горизонтальною площиною та розраховано кут нахилу СФП відносно горизонту. У подальшому знайдено азимут Сонця, який склав 129.9° . Це означає, що в цей момент Сонце розташоване в південно-східній частині небосхилу. Отримане значення повністю узгоджується з фізикою добового руху Сонця для

широт України на початку осені та підтверджує коректність як самої формули, так і алгоритму розрахунку.

2.2 Модель положення Сонця

Розробка та дослідження систем керування СФУ неможливе без математичного опису просторового положення Сонця відносно поверхні Землі. Саме геометрія взаємного розташування Сонця і положення СФП визначає ефективність роботи системи. Тому на початковому етапі моделювання розроблено модель, яка дозволяє визначати кутові координати положення Сонця, за допомогою яких було визначено кути положення СФП у просторі. У даній роботі використовується аналітична модель положення Сонця, побудована на основі класичних співвідношень сферичної астрономії. Такий підхід дозволяє уникнути емпіричних поправок, характерних для спрощених інженерних методик. Вхідними величинами моделі є географічна широта, довгота, час і дата. Код MATLAB [48, 49] моделі та результат її роботи приведено на рисунку 2.6.

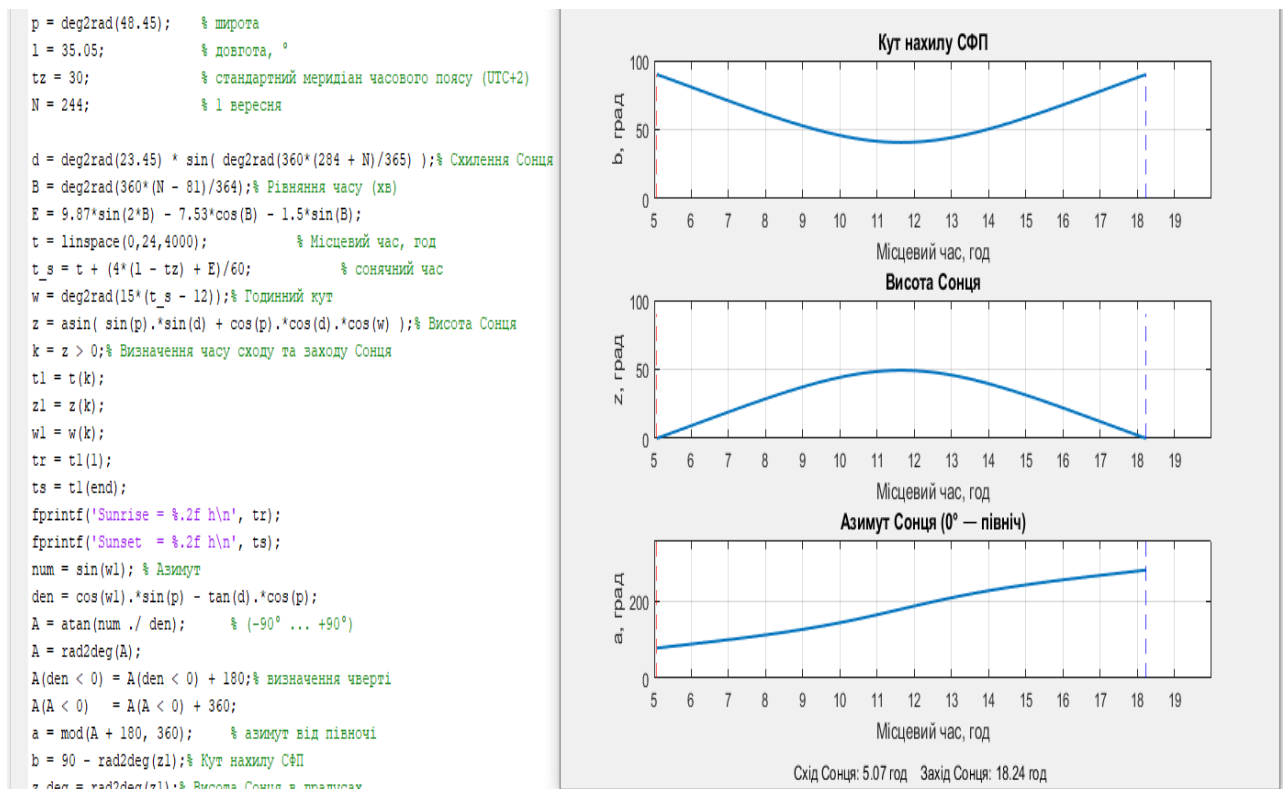


Рис. 2.6 Код і результат роботи моделі

Наведений програмний код реалізує класичну астрономічну модель визначення положення Сонця на небесній сфері. Розрахунки виконуються в рамках сферичної астрономії з використанням канонічних тригонометричних співвідношень.

Спочатку задається географічна широта й довгота місця розташування СФП, довгота стандартного меридіана часового поясу, а також номер дня року. Для побудови графіків зміни кутів положення СФП протягом дня час задається як неперервна величина в межах однієї сонячної доби. Далі визначається схилення Сонця як функція номера дня року. Для цього використовується гармонічна апроксимація річного руху Сонця, яка забезпечує достатню точність для інженерних і науково-прикладних задач сонячної енергетики, що було доведено вище. Наступним кроком є розрахунок рівняння часу, яке враховує нерівномірність видимого руху Сонця, зумовлену ексцентриситетом земної орбіти та нахилом екліптики. Отримане значення використовується для переходу від місцевого поясного часу до істинного сонячного часу для заданої довготи. За істинним сонячним часом визначається годинний кут Сонця, який характеризує його кутове відхилення від місцевого меридіана. На основі годинного кута, широти місцевості та схилення Сонця обчислюється висота Сонця над горизонтом відповідно до рівняння небесної сфери. Денний інтервал формується шляхом відбору моментів часу, для яких висота Сонця є додатною, і визначається час сходу та заходу Сонця. Азимут обчислюється через тангенс годинного кута з використанням аналітичного співвідношення між годинним кутом, широтою та схиленням Сонця. Для визначення чверті горизонту застосовується додаткова логічна корекція на основі знаків чисельника та знаменника тангенса. Остаточне значення азимуту приводиться до географічної системи відліку, у якій нульовий напрямок відповідає півночі, а діапазон зміни становить від 0 до 360 градусів. Кут нахилу СФП задається з умови перпендикулярності нормалі СФП до напрямку сонячного випромінювання і обчислюється як доповнення висоти Сонця до прямого кута. Геометрія пошуку кута нахилу СФП показано на рисунку 2.7.

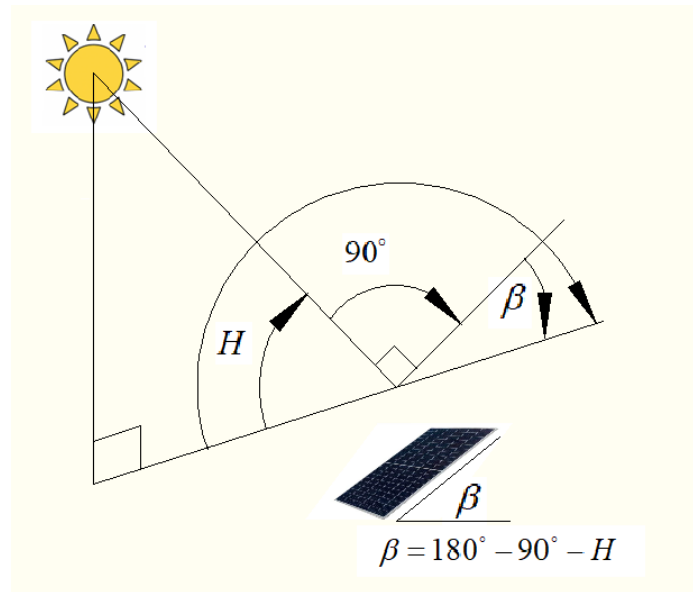


Рис. 2.7 Кут нахилу СФП

На завершальному етапі виконується побудова часових залежностей висоти Сонця, азимуту та кута нахилу СФП, а також графічне позначення часу сходу і заходу Сонця.

Під час моделювання встановлено, що значення азимуту змінюється нелінійно. Це є наслідком сферичної геометрії руху небесних тіл і не може розглядатися як похибка моделі або результат некоректних обчислень. Азимут Сонця визначається як кут між проекцією напрямку на Сонце на горизонтальну площину та напрямком на північ, тоді як реальний рух Сонця відбувається по дузі небесної сфери внаслідок добового обертання Землі. За таких умов при рівномірній зміні годинного кута Сонця, який зростає лінійно з часом, азимут зв'язаний з ним нелінійним тригонометричним співвідношенням, що включає синус, косинус і тангенс годинного кута, а також географічну широту місця спостереження та схилення Сонця. Додаткову нелінійність вносить проєкція просторової траєкторії руху Сонця на горизонтальну площину, внаслідок чого кутова швидкість зміни азимуту не є сталою протягом доби. Коли Сонце знаходиться поблизу горизонту і його траєкторія майже паралельна горизонтальній площині, навіть незначна зміна часу призводить до істотної зміни азимутального кута. Натомість близько часу істинного полудня, під час перетину

Сонцем місцевого меридіана, зміна напрямку на Сонце відбувається значно повільніше. Таким чином, відхилення графіка азимута від прямої лінії відображає реальну кінематику видимого руху Сонця по небесній сфері. Така нелінійна залежність азимутального кута від часу підтверджує адекватність математичної моделі та її відповідність законам сферичної астрономії.

2.3 Інтенсивність сонячного випромінювання та її модель.

Іррадіація (irradiance) - це миттєва інтенсивність потоку сонячної енергії, що надходить на одиницю площі поверхні [50]. Вона визначається як густина потоку енергії електромагнітного випромінювання і вимірюється у ватах на квадратний метр. Розрахувати іррадіацію можна за формулою 2.12.

$$I_{ip} = \frac{dE}{dS}, \quad (2.12)$$

де dE - потік сонячної енергії, що проходить через елементарну площину dS . Якщо поверхня розташована під кутом, то провести розрахунки можна за формулою 2.13.

$$I_{ip} = I_{пряма} * \cos \theta + I_{дифузне} + I_{відбиття}, \quad (2.13)$$

де $I_{пряма}$ - пряма сонячна іррадіація, $I_{дифузне}$ - дифузне випромінювання від атмосфери, $I_{відбиття}$ - випромінювання від оточуючих об'єктів, θ - кут падіння сонячних променів на поверхню.

Інсоляція (irradiation, solar exposure) [51] визначає повну кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю площі поверхні за заданий проміжок часу. Інсоляція дозволяє оцінювати ефективність роботи сонячних енергетичних установок та режими їх функціонування в добовому, сезонному або річному масштабі. У науковій літературі з сонячної енергетики інсоляція зазвичай позначається символом E і вимірюється в $\frac{Дж}{м^2}$ або $\frac{кВт * год}{м^2}$. Інсоляція визначається як часовий інтеграл потоку сонячної енергії, що падає на поверхню, і математично описується формулою 2.14.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I_{ip} dt, \quad (2.14)$$

де t_1, t_2 - часові параметри та I_{lp} - миттєва густина потоку сонячної енергії на поверхні. Величина інсоляції залежить від географічної широти місцевості, пори року, тривалості світлового дня, а також від астрономічного положення Сонця відносно горизонту. Для горизонтальної поверхні інсоляція прямо пропорційна синусу висоти Сонця. Для практичних розрахунків добової інсоляції на горизонтальну поверхню використовується інтегрування за годинним кутом Сонця. Добову інсоляцію можна розрахувати за формулою 2.15.

$$E_{\text{Добова}} = \int_{t_{\text{заходу}}}^{t_{\text{сходу}}} I_{\text{пряма}} * \sin(h) dt + \int_{t_{\text{заходу}}}^{t_{\text{сходу}}} I_{\text{розсіяна}} dt, \quad (2.15)$$

де $t_{\text{сходу}}$ - час сходу Сонця, $t_{\text{заходу}}$ - час заходу Сонця. Перший інтеграл враховує пряме сонячне випромінювання, а другий - розсіяне випромінювання атмосферою. Для нахилених поверхонь, таких як СФП, інсоляція коригується з урахуванням кута нахилу СФП та азимута від півночі.

Добова інсоляція розраховується за формулою 2.16.

$$E_{\text{нп}} = \int_{t_{\text{заходу}}}^{t_{\text{сходу}}} \left(I_{\text{пряма}} * \cos \theta + \frac{I_{\text{розсіяна}} * (1 + \cos \beta)}{2} + \frac{I_{\text{відбита}} * k_{\text{відбиття}} * (1 + \cos \beta)}{2} \right) dt, \quad (2.16)$$

де $k_{\text{відбиття}}$ - коефіцієнт відбиття поверхні. Таким чином, інсоляція залежить від положення Сонця у небі, кута нахилу й орієнтації поверхні, а також від атмосферних умов. Сезонні коливання інсоляції обумовлені зміною висоти Сонця та тривалістю світлового дня, що визначається годинним кутом та географічною широтою. Інсоляція, як інтегральний показник, є більш інформативною, ніж миттєва іррадіація, і використовується для прогнозування ефективності роботи сонячних колекторів, СФП та для оцінки кліматичних умов у різних регіонах.

Ефективність роботи СФП залежить від просторової орієнтації її поверхні відносно Сонця. За умови фіксованого розташування СФП кут падіння сонячних променів протягом доби змінюється, що призводить до зменшення ефективності роботи СФП. Одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності є використання систем активного слідування за Сонцем, у яких кут нахилу та

азимут СФП змінюються відповідно до положення Сонця на небосхилі. У зв'язку з цим актуальною є побудова математичної моделі, яка дозволяє визначати часові залежності астрономічних координат Сонця та відповідних орієнтаційних параметрів СФП, а також оцінювати інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню СФП за умов ідеального слідкування.

На рисунку 2.8 приведено текст програми та результати моделювання інтенсивності сонячного випромінювання.

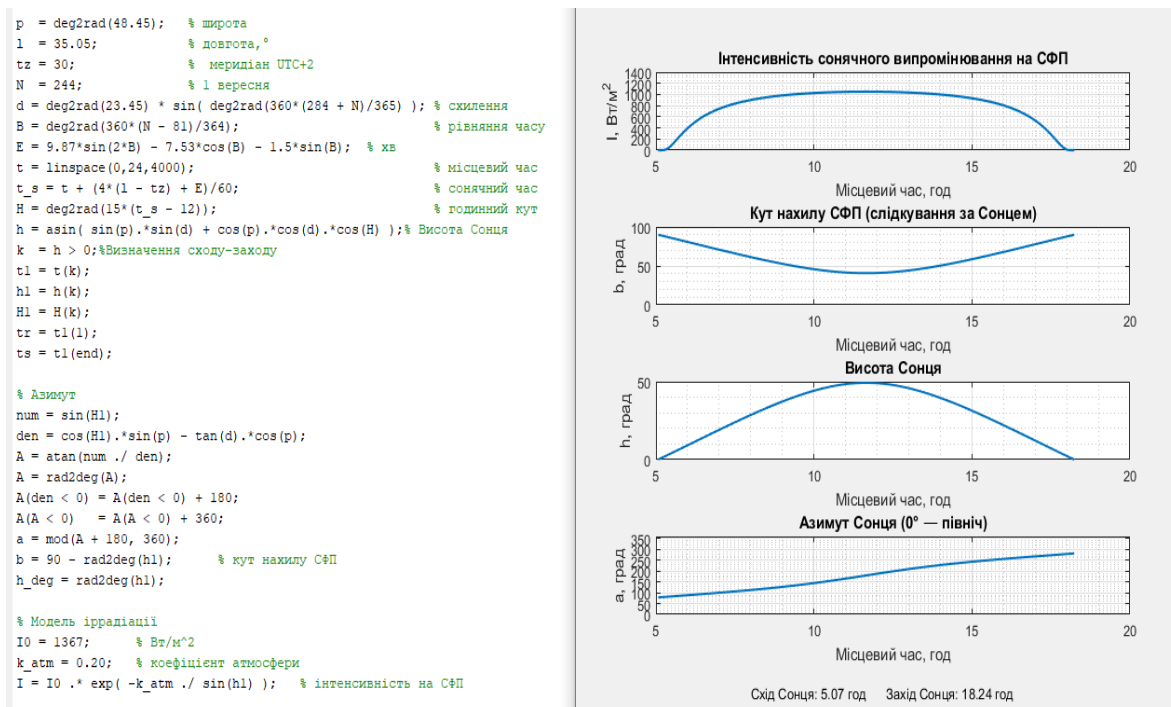


Рис. 2.8 Текст програми й результати моделювання інтенсивності сонячного випромінювання

За основу взята наведена вище модель положення Сонця, доповнена моделлю інтенсивності сонячного випромінювання. Модель реалізує слідкування СФП за Сонцем. Це означає, що нормаль до поверхні СФП у кожен момент часу співпадає з напрямком на Сонце. При цьому кут нахилу СФП розраховується за формулою 2.10. Таким чином, нахил СФП визначається висотою Сонця і змінюється плавно протягом доби, досягаючи мінімальних значень у момент сонячного полудня.

Інтенсивність сонячного випромінювання (ірадіація) на поверхні СФП розраховується на основі позаатмосферної сонячної сталої I_0 з урахуванням ослаблення в атмосфері за формулою 2.17.

$$I = I_0 * \exp\left(-\frac{k_{\text{атмосфери}}}{\sin h}\right), \quad (2.17)$$

де $k_{\text{атмосфери}}$ - коефіцієнт атмосферного ослаблення. За умов ідеального слідкування промені Сонця падають на поверхню СФП під прямим кутом, тому інтенсивність випромінювання визначається лише висотою Сонця та атмосферними втратами. Атмосферне ослаблення описується експоненціальною моделлю. Інтенсивність випромінювання зменшується при малих значеннях висоти, що відповідає фізичним умовам проходження сонячних променів через атмосферу. Шлях проходження світлових променів через атмосферу Землі в різний часовий проміжок зображено на рисунку 2.9.

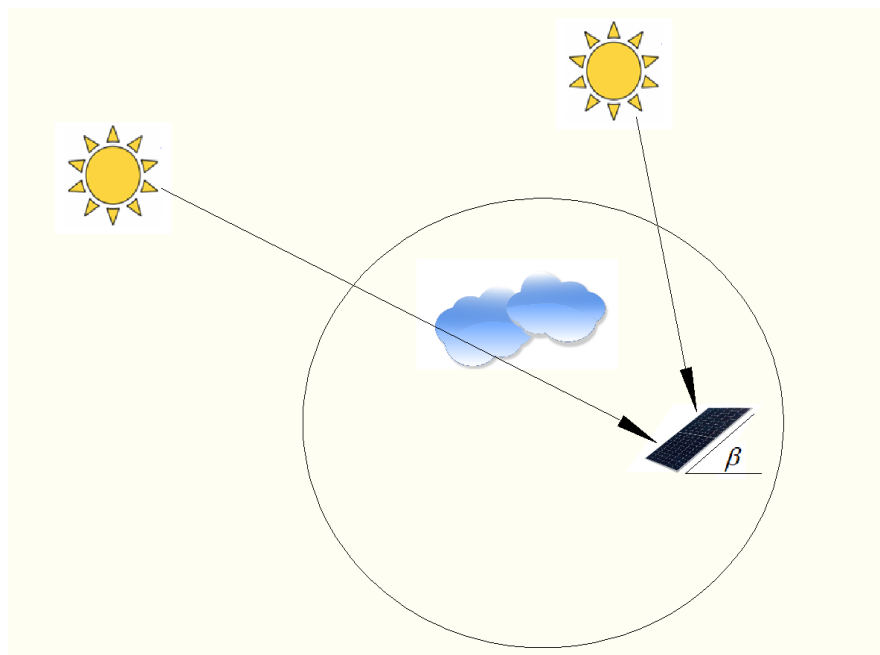


Рис. 2.9 Проходження сонячних променів через атмосферу Землі

На рисунку 2.9 зображено закономірність: чим довший шлях проходження променів через атмосферу - тим більше ослаблення. Це відображено на графіку інтенсивності сонячного випромінювання отриманої моделі на рисунку 2.8. На

сході та заході значне ослаблення сонячної іррадіації на відміну від полуденного часу.

У моделі $k_{\text{атмосфери}}$ приймається сталим, однак, з фізичної точки зору він повинен залежати від хмарності, аерозольного складу атмосфери, вологості повітря, забруднення та висоти Сонця над горизонтом. Таким чином, введення більш складної атмосферної моделі призводить до динамічної зміни $k_{\text{атмосфери}}$ у часі, що безпосередньо вплине на форму добового графіка іррадіації. Це створює основу для подальшого розвитку моделі в напрямку метеорологічно-адаптивного прогнозування. Отримана залежність іррадіації від часу відображає реальну добову зміну енергетичного потенціалу сонячного випромінювання.

2.4 Існуючі метеорологічні моделі

При моделюванні інсоляції на поверхні СФП важливим є врахування впливу атмосфери, оскільки саме атмосфера впливає на рівень ослаблення інтенсивності сонячних променів. Найпростішим рішенням є введення коефіцієнта прозорості атмосфери, як це реалізовано у моделі розробленій вище через параметр $k_{\text{атмосфери}}$. Однак у більш точних розрахунках використовуються спеціалізовані метеорологічні та радіаційні моделі.

Моделі можна умовно поділити на моделі для ясного неба (clear sky models) та моделі з врахуванням хмарності (all sky models). Моделі, які враховують хмарність, поділяються на основі даних з супутника (SARAH3 та інші), в яких хмарність описується як просторово-часове поле, що описує прозорість атмосфери відносно умов чистого неба, та моделі з описом хмар (MODTRAN та інші), на основі рівняння переносу випромінювання, в яких хмарний покрив описується через вертикальні профілі атмосфери, ефективний радіус крапель, фазові функції розсіювання та спектральні коефіцієнти поглинання.

Супутниково-параметричні моделі залежать від зовнішніх джерел даних, не мають замкненого аналітичного вигляду та характеризуються значною алгоритмічною складністю. Це обмежує їх застосування для побудови математичних моделей у дисертаційних дослідженнях. Моделі на основі рівняння

переносу випромінювання мають найбільш повний і коректний підхід, який дозволяє відтворювати радіаційні процеси в атмосфері з високою точністю. Водночас такі моделі потребують великої кількості вхідних параметрів, є доволі складними і не придатні для інтеграції в динамічні моделі СФУ, орієнтовані на аналіз у реальному часі або на задачі керування. Тому в цій роботі буде використано модифіковану модель ясного неба.

Моделі ясного неба - це клас моделей, призначених для розрахунку сонячного випромінювання на земній поверхні за умови повної відсутності хмарності, тобто при ідеально прозорому або квазіпрозорому небі. Такі моделі описують максимально можливу інтенсивність сонячного випромінювання для заданих астрономічних та атмосферних умов і використовуються як базовий еталон при визначенні інсоляції.

Далі описано найвідоміші моделі ясного неба, на основі яких можна розробити модель неба з врахуванням наявності хмар.

Модель ASHRAE 2009 - це модель ясного неба, розроблена Американським товариством інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) [52]. Модель призначена для оцінки рівня сонячної інсоляції на поверхні Землі за відсутності хмар. У моделі ASHRAE сонячна інсоляція складається з прямої (beam), дифузної (diffuse) та відбитої (reflected) інсоляцій. Такий розподіл описує взаємодію сонячного випромінювання з атмосферою, при якому частина прямого сонячного випромінювання досягає поверхні Землі без змін, частина розсіюється аерозолями, і частина може відбиватись поверхонь довкола. Сонячну інсоляцію можна розрахувати за формулою 2.18.

$$E_{\Sigma} = E_b + E_d + E_r, \quad (2.18)$$

де пряма інсоляція - $E_b = E_0 * e^{-\tau_b * m^b}$, маса повітря (довжина шляху сонячного променя в атмосфері) - $m = \frac{1}{\sin \beta}$, дифузна інсоляція - $E_d = E_0 * e^{-\tau_d * m^d}$, відбита інсоляція $E_r = \rho * (E_b * \sin \beta + E_d)$, у яких τ_b - оптична товщина атмосфери прямої

для прямої інсоляції, τ_d - оптична товщина атмосфери дифузної складової, b_b, b_d - емпіричні показники залежності інсоляції від маси повітря, E_0 - позаатмосферна інсоляція.

Модель Hottel [53] розробив Hoyt C. Hotel у 1976 р. Модель Hottel описує пряме випромінювання експоненційною залежністю від повітряної маси та емпіричних коефіцієнтів, що залежать від висоти місцевості й атмосферних умов. Ця модель широко використовується в задачах сонячної енергетики, теплотехніки, а також при моделюванні роботи сонячних фотоелектричних і теплових установок, де необхідно отримати значення іррадіації для безхмарного неба. Основна ідея моделі Hottel полягає у врахуванні послаблення сонячного випромінювання під час його проходження через атмосферу Землі внаслідок поглинання та розсіяння променів повітрям, аерозолями та водяною парою. На відміну від простих експоненційних моделей із сталим коефіцієнтом прозорості, модель Hottel використовує параметризацію атмосферної прозорості, яка залежить від географічних і кліматичних умов місцевості. Іррадіацію за моделлю Hottel можна розрахувати за формулою 2.19.

$$I_{bn} = I_0 * \tau_b, \quad (2.19)$$

де I_0 - позаатмосферна іррадіація, значення якої береться як сонячна стала з поправкою на пори року, коефіцієнт пропускання для прямого випромінювання $\tau_b = a_0 + a_1 * \exp(-\frac{k}{\cos \theta})$, a_0, a_1, k - емпіричні константи, які залежать від висоти та атмосфери.

Недоліком моделі Hottel є те, що вона не враховує спектрального розподілу сонячного випромінювання та інших складних атмосферних процесів. Оскільки в моделі використовуються заздалегідь підібрані коефіцієнти вона вважається емпіричною. Використовується в основному для порівняння з іншими моделями при проектуванні сонячних теплових чи фотоелектричних систем.

Модель прозорого неба Ineichen-Perez [54-56] розроблена Pierre Ineichen та Ricard Perez в 2002 році. Модель описує проходження сонячного випромінювання крізь атмосферу неба без хмар та призначена для оцінювання прямої сонячної

іrrадіації на поверхні Землі з урахуванням атмосферного ослаблення. Вхідними параметрами моделі є миттєва густина потоку сонячного випромінювання, що надходить від Сонця на одиницю площі, орієнтованої перпендикулярно до напрямку сонячних променів та коефіцієнт прозорості атмосфери, який визначається як відношення глобальної іrrадіації на горизонтальну поверхню до відповідної позаатмосферної іrrадіації.

Ще одним параметром у моделі є маса повітря, яка характеризує відносну довжину оптичного шляху сонячного випромінювання в атмосфері. Для зенітного кута Сонця маса повітря визначається як відношення фактичної довжини шляху променя в атмосфері до її вертикальної товщини. У розрахунках використовується емпіричне наближення, яке забезпечує коректність результатів навіть за великих зенітних кутів. На відміну від класичних моделей, де атмосферне ослаблення описується через окремі коефіцієнти поглинання для різних складових атмосфери, у моделі Ineichen-Perez використано коефіцієнт мутності Лінке. Цей коефіцієнт є інтегральною характеристикою, яка узагальнює вплив аерозолів та водяної пари на прозорість атмосфери порівняно з ідеально чистою і сухою атмосферою. Коефіцієнт мутності Лінке показує у скільки разів атмосфера послаблює сонячне випромінювання, ніж атмосфера без домішок.

Особливістю Ineichen-Perez є те, що коефіцієнт мутності Лінке вводиться у формулювання моделі таким чином, що його вплив на іrrадіацію відокремлений від впливу маси повітря. Це дозволяє уникнути некоректних результатів при малих висотах Сонця над горизонтом і забезпечує стабільність моделі у широкому діапазоні географічних широт та сезонів року.

Розрахувати іrrадіацію на поверхні Землі можна за формулою 2.20.

$$I_b = I_{sc} * E_0 * \exp(-k * T_L * m), \quad (2.20)$$

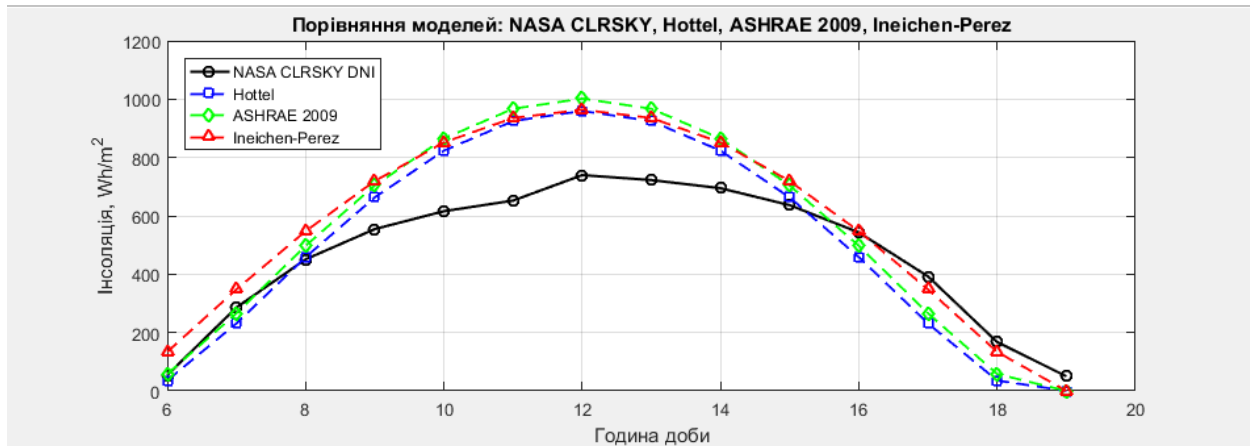
де I_{sc} - сонячна стала, E_0 - коефіцієнт зміни відстані між Землею та Сонцем протягом року, T_L - коефіцієнт мутності Лінке, m - маса повітря, k - коефіцієнт спектрального впливу атмосфери. Модель описує пряму нормальну іrrадіацію як

добуток сонячної сталої, поправки на ексцентриситет земної орбіти та експоненціального множника, що враховує атмосферне ослаблення.

Коефіцієнт мутності Лінке отриманий в результаті спектрального моделювання радіаційного переносу в атмосфері. Модель дає значення іррадіації для конкретного моменту часу та конкретного положення Сонця. Якщо ж виникає необхідність оцінювання інсоляції, наприклад добової або місячної, вона повинна визначатися шляхом інтегрування змодельованої іррадіації за часом. Таким чином, інсоляція є похідною величиною, яка не входить безпосередньо до формулювання моделі. З практичної точки зору модель Ineichen-Perez широко використовується як еталонна модель ясного неба при розробці алгоритмів керування СФУ. Однак модель не враховує вплив хмарності, туманів чи опадів. Для урахування цих факторів необхідне доповнення моделі зовнішніми коефіцієнтами ослаблення або використання моделей класу all-sky.

Для проведення порівняльного аналізу моделей Hottel, Ashare 2009 та Ineichen-Perez необхідно використовувати погодинні дані глобальної інсоляції на горизонтальну поверхню. Такі дані можуть бути отримані з метеорологічних станцій або відкритих баз даних сонячного випромінювання, які надають виміри прямих і розсіяних компонентів інсоляції з високою часовою роздільністю. До найбільш поширених джерел належать доступні бази даних NASA POWER, PVGIS. У рамках дослідження для порівняння моделей обрано дані за один ясний день - 01 вересня 2025 року за умови дотримання перпендикуляра між поверхнею та сонячними променями, що дозволяє проаналізувати поведінку моделей у стандартних умовах без впливу хмарності. Дані погодинної інсоляції охоплюють проміжок від сходу до заходу Сонця, що забезпечує можливість оцінити як ранкові та вечірні значення, так і максимальні пікові величини інсоляції в полудень. Порівняння моделей здійснюється шляхом обчислення прогнозованої глобальної інсоляції для кожної години за обраними моделями та її порівняння з еталонними спостереженнями. Для оцінки точності використані такі статистичні параметри - середня похибка, середньоквадратична похибка та коефіцієнт детермінації.

Такий підхід дозволяє виявити переваги та обмеження кожної моделі та зробити висновки про їх придатність для прогнозування величини інсоляції на заданій території та даті. Результат порівняння приведено на рисунку 2.10.



Статистика моделей щодо NASA CLRSKY:

Hottel: Середня похибка = 48.0659, Середньоквадратична похибка = 144.4618, Коефіцієнт детермінації = 0.61717

ASHRAE 2009: Середня похибка = 82.5791, Середньоквадратична похибка = 164.9413, Коефіцієнт детермінації = 0.50093

Ineichen-Perez: Середня похибка = 105.3216, Середньоквадратична похибка = 150.0074, Коефіцієнт детермінації = 0.58721

Рис. 2.10 Порівняння моделей інсоляції

Щоб отримати дані NASA POWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, сервіс даних сонячної радіації та клімату від НАСА, що надає сонячні змінні для довільної точки на земній поверхні) через HTTP-запит, можна використати запит, який повертає файл даних в браузері у вигляді сторінки електронної таблиці. Формат запиту URL для погодинних даних для міста Дніпра на день 01 вересня 2025 року: https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/hourly/point?parameters=CLRSKY_SFC_SW_DNI&community=RE&longitude=34.98&latitude=48.45&start=20250901&end=20250901&format=CSV&header=true.

Аналіз результатів порівняння моделей Hottel, ASHRAE 2009 та Ineichen-Perez з еталонними даними NASA CLRSKY для ясного неба на дату 01 вересня 2025 року в місті Дніпрі показує, що моделі мають різну точність відтворення глобальної горизонтальної інсоляції. Так, модель Hottel має найменшу середню та середньоквадратичну похибку, що свідчить про менші систематичні відхилення

від реальних даних протягом світлового дня та найвищий коефіцієнт детермінації, що вказує на більшу кореляцію з даними від NASA. В умовах ясного неба та для обраної географічної точки модель Hottel найкраще відтворює як рівень, так і форму добового ходу прямої сонячної іррадіації, наданої як еталон за даними NASA.

Моделі Hottel та Ineichen-Perez призначені для розрахунку іррадіації та не залежить від орієнтації приймальної поверхні. Результат роботи цих моделей можна порівнювати з прямою нормальною іррадіацією, що надається сервісом NASA POWER у вигляді параметра CLRSKY-SFC-SW-DNI. На відміну від цього, модель ASHRAE 2009 орієнтована на оцінювання інсоляції, тобто енергетичного потоку, приведенного до конкретної приймальної поверхні з урахуванням геометрії падіння сонячних променів. Таким чином, вона поєднує в собі як атмосферну складову, так і геометричний чинник, що принципово відрізняє її фізичний зміст від моделей Hottel та Ineichen-Perez. У разі використання слідкуючої системи, для якої нормаль до поверхні постійно співпадає з напрямком на Сонце, інсоляція на поверхні чисельно збігається з прямою нормальною іррадіацією, що створює можливість коректного зіставлення результатів ASHRAE з моделями Hottel та Ineichen-Perez. Таким чином, для дослідження найбільш доцільним є використання моделі Hottel, яка виявилась найстійкішою та статистично найближчою до еталонних значень для вибраної дати та географічного розташування.

2.5 Метеорологічна модель для неба з хмарами

Перехід від моделі чистого неба до моделі неба з хмарами здійснюється шляхом зміни прямої інсоляції відповідно до значення індексу прозорості. Таким чином, зі зменшенням прозорості атмосфери зростає роль дифузної складової. Цей механізм забезпечує перехід між ясними та хмарними умовами без необхідності введення окремих моделей хмар. Для інтеграції хмарного покриття в алгоритм Hottel було використано дані NASA, які надають щогодинні значення рівня хмарності у відсотках для заданої точки.

Вибір даних NASA обґрунтований їх високою достовірністю, широким просторовим охопленням та сумісністю з часовими інтервалами, необхідними для аналізу рівня сонячної іррадіації. Рівень хмарності погодинно можна отримати з сервісу за посиланням: https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/hourly/point?start=20240901&end=20240901&latitude=48.45&longitude=35.05¶meters=CLOUD_AMT&community=AG&format=CSV. Відповіддю на запит буде файл з інформацією про рівень хмарності, приклад файлу приведено на рисунку 2.11.

NASA/POWER Source Native Resolution Hourly Data	
Dates (month/day/year): 07/05/2025 through 07/05/2025 in LST	
Location: Latitude 48.45 Longitude 35.05	
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 101.7 meters	
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999	
Parameter(s):	
CLOUD_AMT	CERES SYN1deg Cloud Amount (%)
-END HEADER-	
YEAR,MO,DY,HR,CLOUD_AMT	
2025,7,5,0,0.99	
2025,7,5,1,4.91	
2025,7,5,2,1.11	
2025,7,5,3,0.61	
2025,7,5,4,28.48	
2025,7,5,5,45.28	
2025,7,5,6,68.69	
2025,7,5,7,87.65	
2025,7,5,8,92.45	
2025,7,5,9,98.62	
2025,7,5,10,88.09	
2025,7,5,11,53.4	
2025,7,5,12,51.94	
2025,7,5,13,47.21	
2025,7,5,14,43.14	
2025,7,5,15,36.17	
2025,7,5,16,29.88	
2025,7,5,17,25.98	
2025,7,5,18,21.1	
2025,7,5,19,17.03	
2025,7,5,20,12.51	
2025,7,5,21,8.0	
2025,7,5,22,7.99	
2025,7,5,23,1.84	

Рис. 2.11 Приклад файлу з показниками рівня хмарності за добу

Значення CLOUD_AMT наближені до 0% відповідають умовам майже повністю ясного неба, тоді як значення, наближені до 100% описують небосхил, затягнутий хмарами. Таким чином, цей параметр є не коефіцієнтом пропускання атмосфери, а мірою ступеня заповнення її хмарним шаром. З огляду на це ефективний коефіцієнт пропускання атмосфери розраховується за формулою 2.21.

$$k = 1 - \frac{CLOUD_AMT}{100} \quad (2.21)$$

Модель хмарного неба побудована на основі описаної вище сонячної моделі з додаванням моделі чистого неба HOTEL з урахуванням реального коефіцієнта хмарності. Розрахунки іррадіації проводяться кожної години, оскільки дані отримані з сервісу NASA погодинні. Для зменшення різких переходів між

щогодинними значеннями NASA застосовується метод ковзного середнього (moving average), який виконує фільтрування даних і забезпечує плавну зміну інсоляції протягом дня. Плавність кривої дозволяє отримати більш реалістичну оцінку доступної сонячної іррадіації, що важливо для подальшого моделювання роботи СФУ. Таким чином, поєднання класичної моделі Hottel із щогодинними даними NASA про хмарність дозволяє отримати комплексну модель прямої горизонтальної іррадіації, яка враховує як фізичні процеси поширення сонячного випромінювання в атмосфері, так і варіації погодних умов. Результат роботи моделі та текст програми приведено на рисунку 2.12.

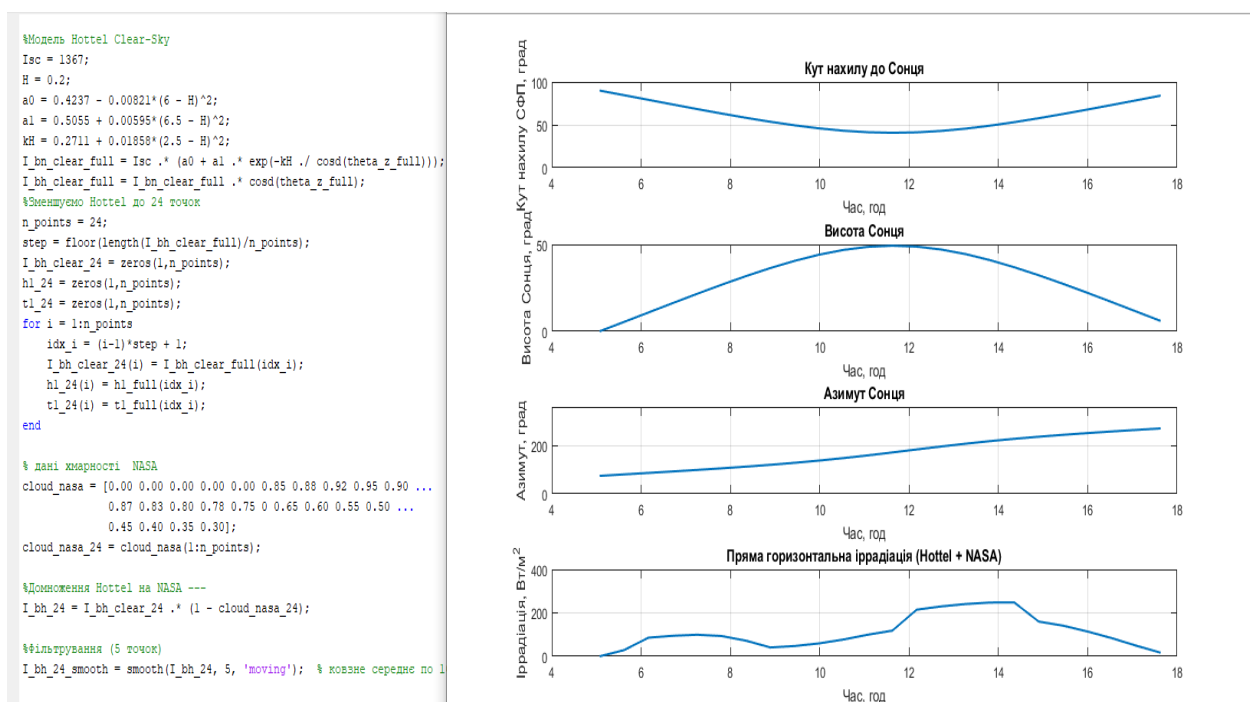


Рис. 2.12 Модель Хотел з показником хмарності на основі даних NASA

Розрахунок починається з визначення сонячної геометрії, зокрема зенітного кута Сонця, на основі широти місцевості, дня року та сонячного часу. Далі обчислюється косинус зенітного кута, який є ключовою величиною для визначення маси повітря. За умови ясного неба маса повітря апроксимується оберненою величиною до косинуса зенітного кута, що є прийнятним наближенням для інженерних розрахунків при помірних кутах висоти Сонця. Після цього визначається пряма нормальна іррадіація як добуток сонячної сталої

та емпіричної функції пропускання атмосфери, побудованої з використанням коефіцієнтів a_1 , a_2 , які розраховуються за формулами 2.22, 2.23.

$$a_1 = 0.4237 - 0.00821 * (6 - H)^2 \quad (2.22)$$

$$a_2 = 0.5055 - 0.00595 * (6.5 - H)^2 \quad (2.23)$$

Коефіцієнт a_1 відповідає за базовий рівень атмосферного пропускання при малих значеннях маси повітря, тобто за умов, коли Сонце розташоване високо над горизонтом. Коефіцієнт a_2 визначає амплітуду експоненціального спадання іррадіації зі зростанням маси повітря. Числа 6 та 6.5 у формулах є емпіричними зсувами, введеними для забезпечення найкращої відповідності експериментальним даним у діапазоні висот, характерних для більшості територій. Таким чином, залежність від висоти враховує зменшення товщини атмосфери та концентрації поглинаючих компонентів. Після цього розраховується значення іррадіації за моделлю Hottel та отриманий результат помножується на ефективний коефіцієнт пропускання k . Такий підхід є науково обґрунтованим і дозволяє дослідити алгоритми керування положенням СФП у конкретних географічних точках, що особливо актуально для досліджень ефективності роботи СФУ.

2.6 Існуючі моделі СФП

Математичне моделювання широко застосовується в сучасній науці та дозволяє дослідити процеси, які виникають при функціонуванні проєктованих систем керування. Залежно від рівня деталізації та поставленої задачі, використовують статичні алгебраїчні моделі, які описують вольт-амперну характеристику фотоелектричного елемента за фіксованих умов освітленості та температури. Такі моделі широко застосовуються при розробці та дослідженні систем з СФП.

Модель одного діода (Single Diode Model) [57-59] описує еквівалентне коло одного діода і враховує короткозамкнений струм та напругу холостого ходу СФП. За моделлю одного діода еквівалентну схему можна представити у вигляді схеми,

що складається з джерела енергії, діода і двох резисторів. Схема зображена на рисунку 2.13.

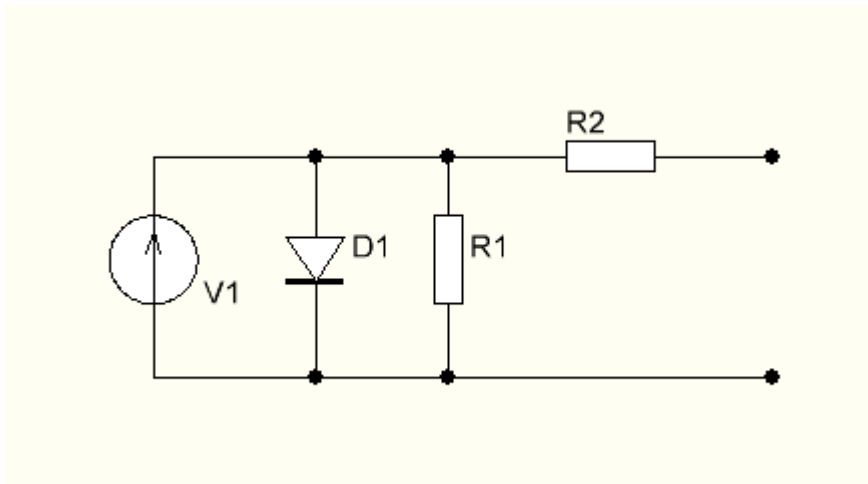


Рис. 2.13 Еквівалентна схема математичної моделі одного діода

Така модель використовується для моделювання роботи одного сонячного модуля. Фотоелектричний елемент розглядається як напівпровідник з р-п переходом, у якому під дією сонячного випромінювання відбувається генерація електрон-діркових пар. За наявності внутрішнього електричного поля р-п переходу носії заряду розділяються, що призводить до виникнення електричного струму в зовнішньому колі. Для опису цих процесів використовується еквівалентна електрична схема, яка складається з джерела фотоструму $V1$, діода $D1$, послідовного $R2$ та шунтуючого $R1$ опорів. Вихідний струм фотоелектричного елемента визначається за формулою 2.24.

$$I = I_F - I_D - I_{R2}, \quad (2.24)$$

де I_F - фотострум, I_D - струм через діод, I_{R2} - струм через резистор $R2$. Це рівняння є нелінійним та неявним відносно струму I , що зумовлює необхідність застосування чисельних методів для його розв'язання.

Фотострум I_F є результатом поглинання сонячного випромінювання напівпровідником і в першому наближенні пропорційний інсоляції. З урахуванням температурної залежності він визначається співвідношенням 2.25.

$$I_F = \frac{E}{E_{опорне}} * (I_{кз} + \alpha_I(T - T_{опорне})), \quad (2.25)$$

де E - інсоляція, $E_{опорне}$ - опорна інсоляція, α_t - температурний коефіцієнт, T - температура фотоелемента, $T_{опорне}$ - опорна температура фотоелемента, $I_{кз}$ - струм короткого замикання. Струм діода можна розрахувати, використавши рівняння Шоклі, формула 2.26.

$$I_D = I_0 * (\exp(\frac{V + I * R2}{n * V_t}) - 1), \quad (2.26)$$

де I_0 - зворотний струм діода, $R2$ - послідовний опір, n - коефіцієнт ідеальності діода, V_t - теплова напруга, яка розраховується за формулою 2.27.

$$V_t = \frac{k * T}{q}, \quad (2.27)$$

де k - стала Больцмана, q - заряд електрона. Струм через шунтовий опір можна знайти, використавши закон Ома за формулою 2.28.

$$I_{R2} = \frac{V + I * R1}{R2} \quad (2.28)$$

У моделі одного діода зворотний струм діода можна розрахувати за формулою 2.29.

$$I_0 = \frac{I_{кз}}{\exp(\frac{q * V_{xx}}{n * k * T}) - 1}, \quad (2.29)$$

де $I_{кз}$ - паспортний струм короткого замикання, V_{xx} - напруга холостого ходу, $q = 1.6 * 10^{-19}$ - заряд електрона, $k = 1.3806 * 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ - стала Больцмана, T - температура, n - ідеальність діода. Послідовний опір $R1$ визначає втрати напруги у фотоелементі та впливає на нахил вольтамперної характеристики в області максимальної потужності, тоді як шунтуючий опір $R2$ описує паразитні струми витоку і впливає на характеристику в області малих напруг. У практичних задачах ці параметри можна виміряти або прийняти за типовими значеннями для відповідного класу фотоелементів. Для кожного заданого значення напруги U вихідний струм I визначається чисельно, після чого електрична потужність фотоелемента обчислюється як добуток напруги на струм ($P = U * I$). Максимум цієї функції відповідає робочій точці максимальної потужності (MPP, Maximum

Power Point), значення якої змінюється залежно від інсоляції та температури. Таким чином, модель одного діода формує математичний зв'язок між сонячною інсоляцією, температурою фотоелектричного елемента та його електричними характеристиками.

Модель двох діодів (Two-Diode Model) [60, 61] більш складна, оскільки включає два діоди, які описують різні електричні процеси в сонячному модулі. Модель двох діодів є розвитком класичної моделі одного діода та використовується для більш точного відтворення вольт-амперної характеристики фотоелектричного елемента в широкому діапазоні робочих режимів. Її застосування доцільне за низьких рівнів опромінення, при підвищених температурах та у зоні малих напруг, де вплив рекомбінаційних процесів у шарі просторового заряду стає суттєвим. У моделі перший діод відповідає за дифузійну рекомбінацію у квазінейтральних областях напівпровідника, другий - за рекомбінацію в області p-n переходу. Еквівалентна схема математичної моделі двох діодів приведена на рисунку 2.14.

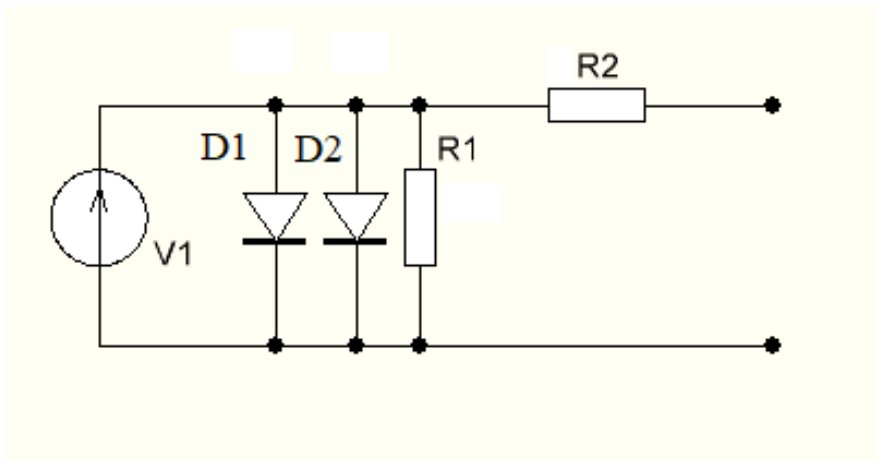


Рис. 2.14 Еквівалентна схема математичної моделі двох діодів

Струм за дводіодною моделлю можна розрахувати за формулою 2.30. Це рівняння є нелінійним трансцендентним.

$$I = I_{ph} - I_1 * \left(\exp\left(\frac{V + I * R2}{n1 * V_T}\right) - 1 \right) - I_2 * \left(\exp\left(\frac{V + I * R2}{n2 * V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I * R2}{R1}, \quad (2.30)$$

де I_{ph} - фотострум, I_1 - струм насичення діода $D1$, I_2 - струм насичення діода $D2$, $n1$ - коефіцієнт ідеальності $D1$, $n2$ - коефіцієнт ідеальності $D2$, V_T - тепловий потенціал ($V_T = \frac{k * T}{q}$). Послідовний опір описує втрати в контактних переходах та з'єднувальних провідниках. Шунтовий опір описує паразитні витоки струму через дефект кристалів та витоки між з'єднаннями елементів. Модель двох діодів є неявною відносно струму, оскільки струм входить як у ліву, так і в праву частину рівняння. Це призводить до необхідності застосування чисельних методів для розрахунку, наприклад методу Ньютона або ітераційних методів. Перевагою моделі двох діодів є висока точність симуляції роботи СФП. Водночас збільшення кількості параметрів ускладнює процедуру ідентифікації моделі за експериментальними даними. На практиці це означає, що для інженерних розрахунків часто застосовують модель одного діода, тоді як модель двох діодів використовується в наукових дослідженнях та в задачах, де критично важливо коректно описати рекомбінаційні втрати. Таким чином, модель двох діодів займає концептуально важливе місце між простими інженерними апроксимаціями та повнофізичними напівпровідниковими моделями.

Модель трьох діодів [62-66] є подальшим розвитком попередньо розглянутих моделей і належить до класу еквівалентних електричних моделей СФП. У моделі сонячний елемент розглядається як джерело фотоструму, паралельно якому підключені нелінійні елементи, що описують рекомбінаційні процеси. Еквівалентна схема математичної моделі трьох діодів приведена на рисунку 2.15.

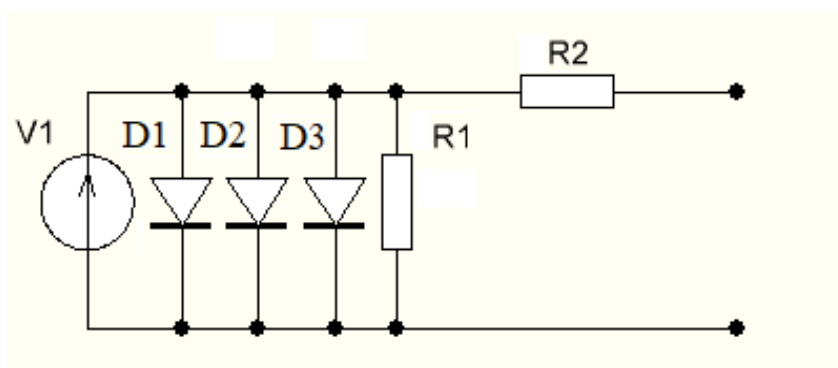


Рис. 2.15 Еквівалентна схема математичної моделі трьох діодів

Еквівалентна схема моделі трьох діодів має джерело фотоструму I_1 , три паралельно підключені діоди, послідовний опір R_2 та шунтуючий опір R_1 . Кожен з діодів має власний струм насичення та коефіцієнт ідеальності. Діод D_1 описує дифузійну рекомбінацію в квазінейтральних областях p-n переходу. Коефіцієнт ідеальності діода D_1 наближений до одиниці. Діод D_2 описує рекомбінації в області просторового заряду, зумовлені дефектами кристалічної ґратки. Коефіцієнт ідеальності діода D_2 наближений до двох. Діод D_3 описує додаткові нелінійні втрати, які не можуть бути коректно відтворені моделлю з двома діодами. Коефіцієнт ідеальності діода D_3 підбирається на основі експериментальних даних. Струм за моделлю трьох діодів можна розрахувати за формулою 2.31.

$$I = I_{ph} - I_1 * (\exp(\frac{V + I * R_2}{n_1 * V_T}) - 1) - I_2 * (\exp(\frac{V + I * R_2}{n_2 * V_T}) - 1) - I_3 * (\exp(\frac{V + I * R_2}{n_3 * V_T}) - 1) - \frac{V + I * R_2}{R_1}, \quad (2.31)$$

де I_{ph} - фотострум, I_1 - струм насичення діода D_1 , I_2 - струм насичення діода D_2 , I_3 - струм насичення діода D_3 , n_1 - коефіцієнт ідеальності D_1 , n_2 - коефіцієнт ідеальності D_2 , n_3 - коефіцієнт ідеальності D_3 , $V_T = \frac{k * T}{q}$ - тепловий потенціал.

Рівняння моделі трьох діодів є неявним відносно струму, що потребує чисельного розв'язання. При цьому кількість параметрів істотно зростає, що ускладнює процедуру ідентифікації моделі. Саме ця обставина є головним обмеженням практичного застосування моделей двох і трьох діодів. Модель трьох діодів точно відтворює експериментальні ВАХ у всьому робочому діапазоні, включно з областю надмалих напруг, де модель двох діодів дає похибку. Модель трьох діодів особливо корисна для дослідження нових матеріалів, деградованих або дефектних структур, а також у наукових роботах, де важлива інтерпретація окремих механізмів втрат. Водночас у прикладних інженерних задачах модель трьох діодів застосовується рідко, оскільки перевага в точності часто не компенсує зростання складності та нестійкості параметричної ідентифікації. Порівняння ВАХ моделей СФП приведено на рисунку 2.16.

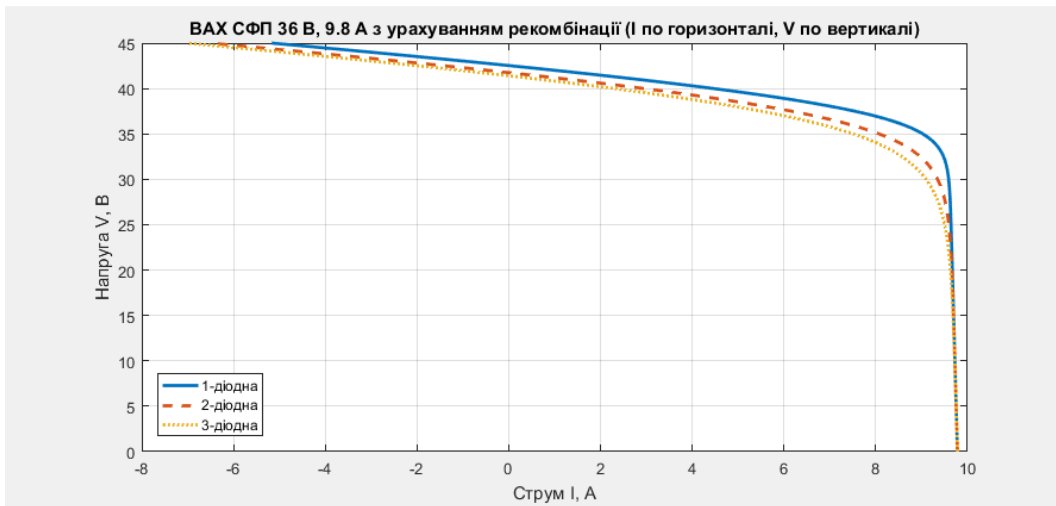


Рис. 2.16 ВАХ моделей СФП

Для СФП з напругою холостого ходу 36 В та струмом короткого замикання 9.8 А розглянуто три моделі. Усі моделі реалізовані через неявне рівняння струму з урахуванням послідовного та шунтуючого опору, фотоструму та струмів насичення окремих діодів. Модель одного діода забезпечує просту ідентифікацію параметрів і адекватно описує ВАХ у робочій області максимальної потужності, при цьому ВАХ має характерний експоненційний вид. Модель двох діодів відображає рекомбінаційні процеси в збідненій області р-п переходу. Це призводить до незначного зменшення струму на малих напругах. Модель трьох діодів моделює поверхневу рекомбінацію. Порівняння показує, що збільшення кількості діодів покращує опис крайових процесів, але не змінює суттєво характеристик у робочій зоні.

Ці моделі використовуються для різних цілей. Наприклад, за допомогою цих математичних моделей відбувається тестування, дизайн сонячних енергетичних систем, визначення потужності генерації електроенергії та вирішення проблем технічного обслуговування. Кожна модель має свої переваги та обмеження, а вибір конкретної моделі залежить від конкретних завдань та умов застосування.

Одним з ключових аргументів на користь вибору для моделювання в цій роботі моделі одного діода є компроміс між простотою та фізичною обґрунтованістю, оскільки вона містить мінімальну кількість параметрів, що

потребують ідентифікації, використовує паспортні дані СФП без коефіцієнтів, для отримання значень яких треба проводити складні експериментальні вимірювання. На рисунку 2.17 приведено ВАХ та потужнісну характеристику СФП моделі одного діода.

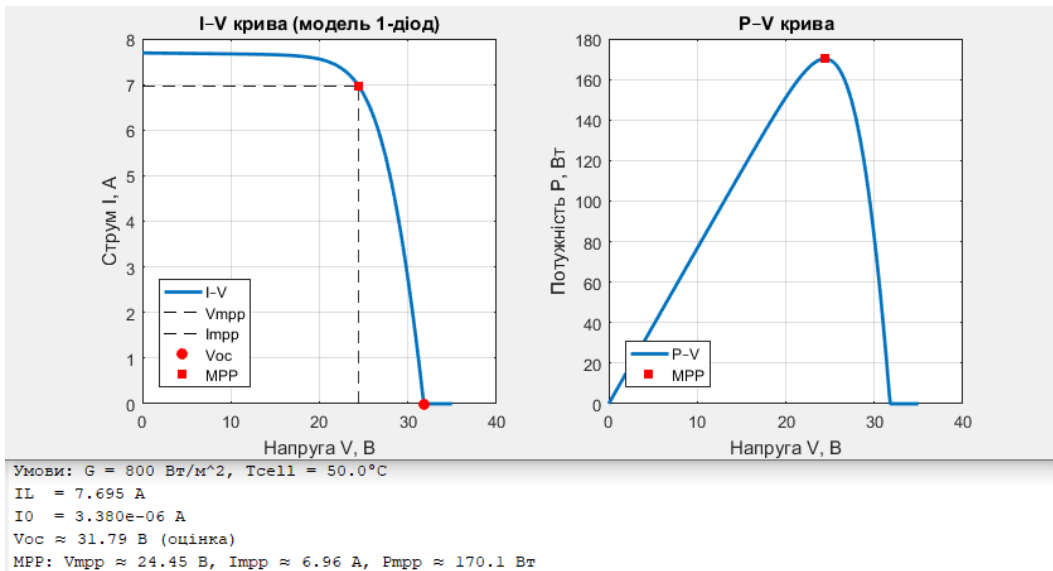


Рис. 2.17 ВАХ та потужнісна характеристика СФП моделі одного діода

Крім того, відносно невелика кількість параметрів забезпечує стабільність і швидкість чисельного розв'язання нелінійного рівняння, що особливо важливо для симуляцій у середовищах для моделювання.

2.7 Модель СФУ

Для створення систем слідкування СФП за Сонцем доречно дослідити розроблений алгоритм не на реальному об'єкті, а на моделі, оскільки процес дослідження на моделі прискорює цей процес та дає змогу виявити проблеми ще на моменті відладки алгоритму керування. Такий підхід забезпечує безпечне та економічно ефективно тестування, дозволяє змінювати параметри освітленості, кути нахилу СФП без ризику пошкодження реальної системи, а також полегшує збір високоточних даних для подальшого аналізу. Для цього треба розробити точну математичну модель. Для оцінки ефективності слідкування СФП за Сонцем важливо моделювати миттєву потужність СФП, що виникає внаслідок взаємодії сонячної іррадіації та електричних характеристик СФП. Основною задачею моделі є визначення MPP та розрахунок потужності на навантаженні [67-69]. Для

цього ідеально підходить модель одного діода розглянута вище. Вона відтворює нелінійну залежність струму від напруги та враховує вплив внутрішніх параметрів СФП. Повна формула рівняння моделі одного діода приведено нижче (формула 2.32).

$$I = I_{\text{фотострум}} - I_0 * (\exp * (\frac{V + I * R2}{n * V_t}) - 1) - \frac{V + I * R2}{R1} \quad (2.32)$$

Через нелінійність рівняння струму та його залежність від самого себе в експоненті його аналітичного розв'язку не існує. Тому для отримання миттєвого значення струму застосовується чисельне розв'язання, яке в MATLAB реалізовано через функцію *fsolve*. Алгоритм чисельного розрахунку підбирає для кожної заданої напруги такий струм, щоб обидві частини рівняння були рівні між собою з заданою дослідником точністю.

Отриманий струм використовується для обчислення миттєвої потужності як добутку напруги на струм. Для кожного моменту часу визначається максимальна потужність серед усіх обчислених значень, що визначає MPP. Чисельне визначення струму та потужності в моделі одного діода враховує нелінійність характеристик СФП, зміну інсоляції та атмосферні умови. Це дозволяє будувати реалістичні добові криві потужності, оцінювати ефективність слідкування за Сонцем та прогнозувати генерацію електроенергії без необхідності дорогих та трудомістких експериментів. Історично цей підхід сформувався на основі досліджень Вільяма Шоклі в середині XX століття і став основою сучасних алгоритмів, які застосовуються у фотоелектричних системах з динамічним орієнтуванням СФП та змінною освітленістю.

Модель системи автоматичного керування положенням СФП з урахуванням атмосферних факторів приведено на рисунку 2.18. У розробленій моделі СФУ не враховано роботу системи позиціонування, оскільки швидкість руху системи набагато вища, ніж швидкість руху Сонця по небосхилу. Тому, щоб не ускладнювати модель, було прийнято рішення в моделі СФУ не враховувати систему слідкування. В розробленій моделі СФУ спочатку задаються вхідні параметри системи, що включають географічні координати місцевості, часову

зону, день року та часовий інтервал моделювання, що дозволяє визначити положення Сонця над горизонтом протягом доби.

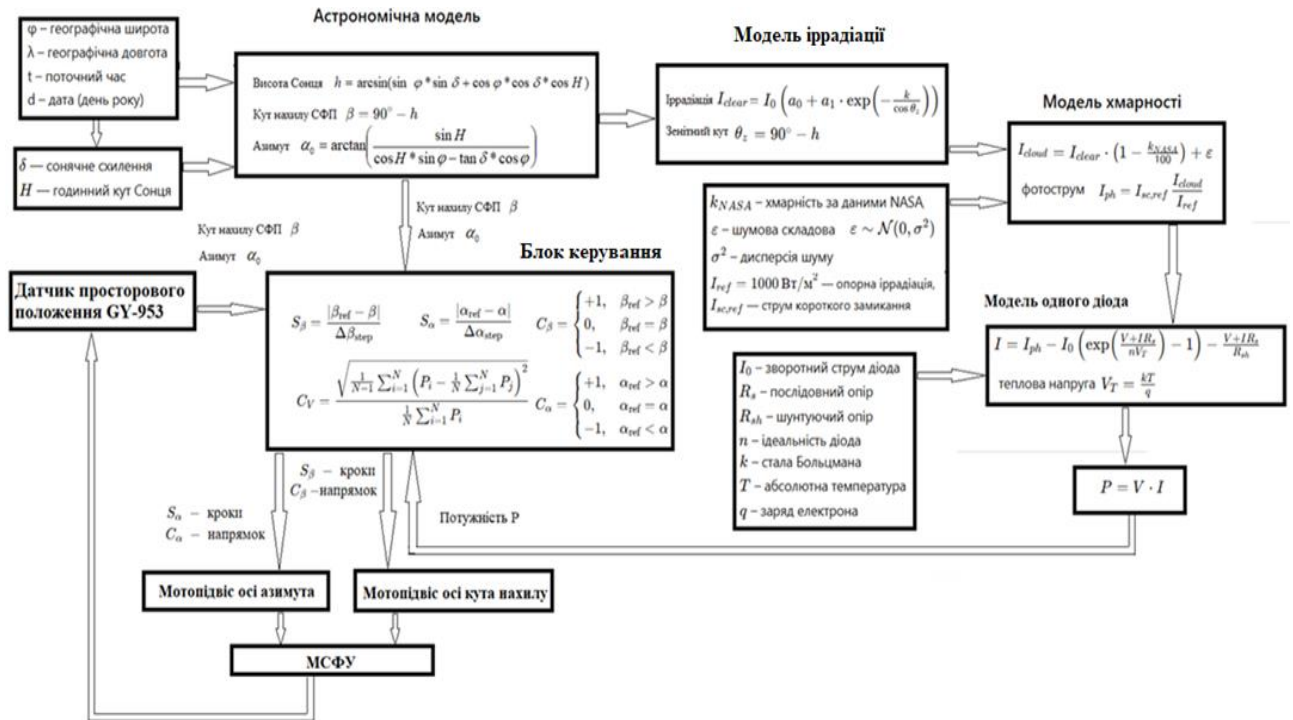


Рис. 2.18 Модель системи автоматичного керування положенням СФП з урахуванням атмосферних факторів

На основі цих даних обчислюються астрономічні параметри, такі як кут нахилу Сонця та азимут, а також корекції, що враховують ексцентриситет орбіти Землі та рівняння часу, що забезпечує точне визначення сонячного часу.

Після цього для отримання значення іррадіації використано модель Hottel Clear-Sky, яка дозволяє розрахувати пряму горизонтальну іррадіацію за умови чистого неба, враховуючи атмосферні параметри. Для більш реалістичної оцінки іррадіації дані коригуються за допомогою фактичної хмарності, взятої з сервісу NASA, що дозволяє отримати миттєву іррадіацію на поверхню СФП, а для згладжування локальних стрибків застосовується ковзне середнє. Потім задаються електричні параметри СФП для моделі одного діода, включаючи фотострум, струм насичення діода, коефіцієнт ідеальності, послідовний та шунтовий опори, кількість послідовних елементів у СФП та тепловий потенціал, що забезпечує правильне формування нелінійної характеристики СФП. Для кожного моменту

часу обчислюється миттєвий фотострум, пропорційний поточній іррадіації, після чого формується робочий діапазон напруг, на якому буде виконуватися чисельне рішення. Для розрахунку напруги використано чисельний метод, який дозволяє розв'язати нелінійне рівняння моделі одного діода, де струм присутній як у лінійній частині, так і в експоненціальній залежності. Ітераційний розрахунок проводиться до досягнення збіжності, після чого обчислюється миттєва потужність як добуток напруги на струм. Серед отриманих значень визначається максимальна потужність, що відповідає MPP, а для підключеного резистивного навантаження розраховується струм через нього та потужність на навантаженні за законом Ома. Цей процес повторюється для всіх моментів часу протягом дня, що дозволяє побудувати добові криві потужності, включаючи як MPP, так і потужність на навантаженні. Результат роботи моделі приведено на рисунку 2.19.

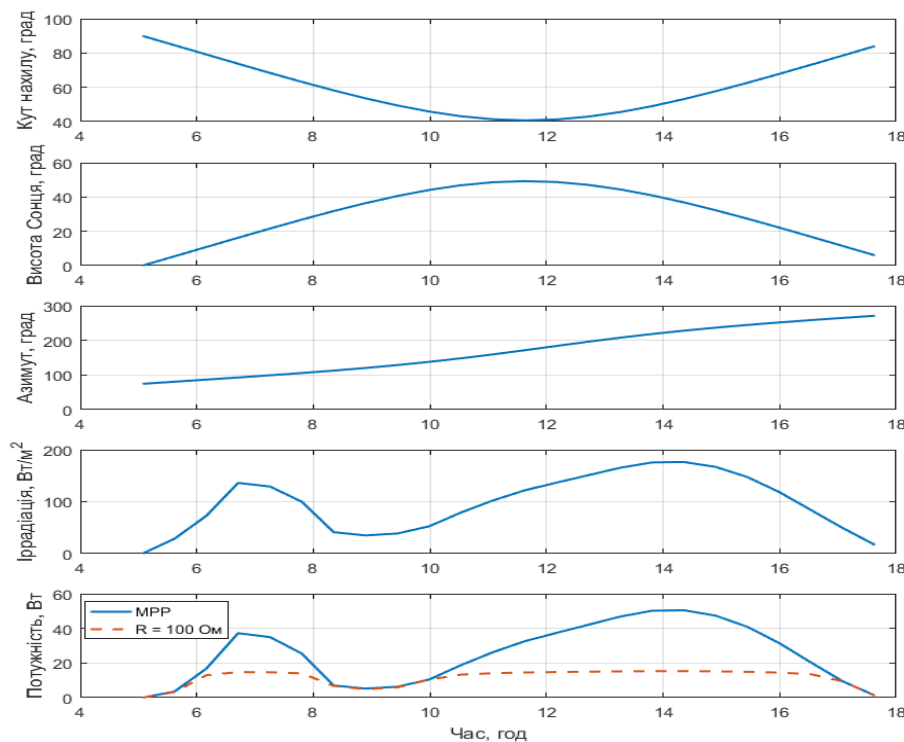


Рис. 2.19 Модель СФУ.

У результаті моделювання отримано повний набір даних про положення Сонця, кут нахилу СФП, азимут, миттєву іррадіацію та відповідну потужність, що дозволяє оцінювати ефективність слідкування СФП за Сонцем і прогнозувати генерацію електроенергії в реальних умовах. Цей підхід дозволяє перевіряти

алгоритм керування, коригувати його параметри та аналізувати роботу системи без необхідності проведення дорогих польових експериментів, що значно підвищує швидкість дослідження та надійність отриманих результатів.

Висновки до розділу 2

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано механізм роботи СФУ та підбрано моделі, які дозволяють адекватно описати процеси генерації електричної енергії під впливом змінної інсоляції та положення Сонця на небосхилі. Розроблений алгоритм моделювання дозволяє комплексно оцінювати роботу системи, враховуючи не тільки положення Сонця над горизонтом у конкретні години доби, але й вплив атмосферних факторів, що суттєво корелюють із змінами миттєвої іррадіації. Параметри місцевості, включаючи географічну широту, довготу та день року, забезпечують правильне визначення висоти Сонця, азимута та сонячного часу, що в поєднанні з моделлю Hottel Clear-Sky дозволяє отримати базову оцінку інтенсивності сонячного випромінювання на поверхню СФП. Корекція отриманих даних за допомогою фактичних даних про хмарність, взятих із супутникових спостережень NASA, дозволяє сформувати реалістичну криву миттєвої іррадіації, яка відображає природні коливання освітленості протягом дня, включаючи зменшення інтенсивності іррадіації на сході та заході Сонця та під час покриття хмарами. Для згладжування кривої іррадіації застосовується ковзне середнє, що усуває локальні стрибки та артефакти, які спричинені отриманням вихідних даних від NASA погодинно.

Для розрахунку миттєвої потужності СФП застосовується модель одного діода, яка відображає основні фізичні процеси, що відбуваються всередині СФП, включаючи генерацію фотоструму, насичення діода, вплив послідовного та шунтового опорів, а також вплив температури та кількості послідовних елементів у СФП. Обчислення миттєвої потужності проводиться як добуток напруги на струм, що забезпечує формування повної характеристики СФП за потужністю, включаючи визначення MPP. Для практичних застосувань, коли СФП підключена до електричного навантаження, миттєвий струм через навантаження також

визначається за моделлю одного діода, після чого потужність на навантаженні обчислюється за законом Ома, що дає змогу порівняти реальну потужність з максимальною теоретичною потужністю, отриманою при роботі в MPP.

Аналіз результатів моделювання показав, що розроблений підхід дозволяє побудувати повні добові криві потужності СФП, включаючи як максимальну потужність, так і потужність на підключеному навантаженні, що суттєво залежить від миттєвої інсоляції та кута падіння сонячних променів на поверхню СФП. Графіки демонструють закономірне зростання потужності в ранкові години зі сходом Сонця, досягнення максимуму в середині дня при оптимальному положенні Сонця та поступове зменшення потужності у вечірні години. При цьому потужність на конкретному навантаженні, наприклад резистивному опорі 100 Ом, завжди менша або дорівнює потужності MPP, за винятком випадків, коли інсоляція практично дорівнює нулю через сильне покриття хмарами або на сході та заході Сонця. Такий результат відповідає фізичним закономірностям роботи фотоелектричних елементів та підтверджує правильність застосованої чисельної методики. Важливо відзначити, що застосування чисельного методу дозволяє враховувати всі нелінійні ефекти, включаючи вплив послідовного опору, що зменшує напругу на СФУ при високих струмах, та шунтового опору, що обмежує струм у низьковольтних діапазонах, що в комплексі формує точну потужнісну характеристику.

Розроблений підхід демонструє універсальність, оскільки він може бути адаптований до різних типів СФП, змінних атмосферних умов, різних типів навантажень, включаючи активні електронні системи управління. Водночас моделювання на рівні алгоритму слідкування за Сонцем дозволяє перевіряти ефективність механічних систем повороту СФП, прогнозувати добові вироблення електроенергії, оцінювати потенційний приріст енергії від трекінгу порівняно з фіксованим положенням, а також оптимізувати енергетичний баланс систем автономного живлення. Використання цієї методики астрономічного розрахунку положення Сонця, моделі Hottel Clear-Sky з корекцією на хмарність, чисельного рішення моделі одного діода для розрахунку струму та потужності, а також

врахування впливу навантаження дозволяє формувати комплексне уявлення про роботу СФУ протягом доби. Такий підхід є економічно ефективним, безпечним, оскільки не потребує проведення польових експериментів і науково обґрунтованим, оскільки враховує всі основні фізичні та електричні процеси, що відбуваються в СФП. Отримані результати формують надійну методологічну базу для подальших досліджень, зокрема для розробки алгоритмів керування положенням у просторі СФП з врахуванням умов хмарності. Таким чином, виконане дослідження демонструє наукову цінність і практичну значущість моделювання роботи СФУ.

РОЗДІЛ 3

Ідентифікація стану атмосфери та керування генерацією в сонячних фотоелектричних системах

3.1 Аналіз факторів, які впливають на генеровану потужність

Ефективність роботи СФП визначається сукупністю електричних і просторово-геометричних чинників, серед яких можна виділити режим роботи електричного навантаження СФП та орієнтацію СФП відносно Сонця. Незважаючи на конструктивну простоту СФП, процес перетворення сонячної енергії в електричну є суттєво нелінійним і чутливим як до внутрішніх параметрів елемента, так і до зовнішніх умов експлуатації.

3.1.1 Просторово-часова орієнтація світлочутливої поверхні СФП

Кут падіння сонячних променів є одним з чинників [70], який впливає на ефективність роботи СФУ. Максимальна потужність генерується у випадку, коли сонячні промені падають на площину СФП перпендикулярно до неї. При цьому вся активна поверхня фотоелементів бере участь у поглинанні сонячної енергії, і втрати, зумовлені геометричними факторами, відсутні. Графік зміни потужності жорстко закріпленої СФП протягом дня в сонячну погоду приведено на рисунку 3.1. Як вбачається з графіка, максимум енергії СФП виробляє при умові падіння променів сонця на поверхню СФП під перпендикуляром з невеличким відхиленням. Слабка чутливість вихідної потужності СФП до невеликих відхилень кута падіння сонячних променів значною мірою зумовлена оптичними властивостями поверхні фотоелектричних елементів. Антивідбивні покриття та мікротекстурована структура поверхні кремнію формуються таким чином, щоб мінімізувати коефіцієнт відбиття не лише для нормального, але й для широкого діапазону кутів падіння випромінювання.

Внаслідок багаторазового внутрішнього відбиття між мікронерівностями та інтерференційними ефектами у тонких плівках зберігається високий рівень поглинання фотонів, навіть при відхиленні променів від перпендикуляра. При значному відхиленні кута падіння сонячних променів від перпендикуляра спостерігається зменшення потужності, яку генерує СФП. Це зумовлено тим, що

складова інтенсивності випромінювання, яка перетворюється в електричну енергію, пропорційна косинусу кута між нормаллю до поверхні СФП та напрямком поширення сонячного випромінювання. У практичних умовах відхилення проявляється у відчутному зниженні коефіцієнта корисної дії системи, оскільки навіть невеликі відхилення від оптимального кута встановлення призводять до втрат генерації енергії. З огляду на зазначене, орієнтація та кут нахилу СФП мають бути розраховані з урахуванням сезонних змін висоти Сонця над горизонтом, аби забезпечити наближення променів до перпендикулярного падіння та мінімізувати геометричні втрати.

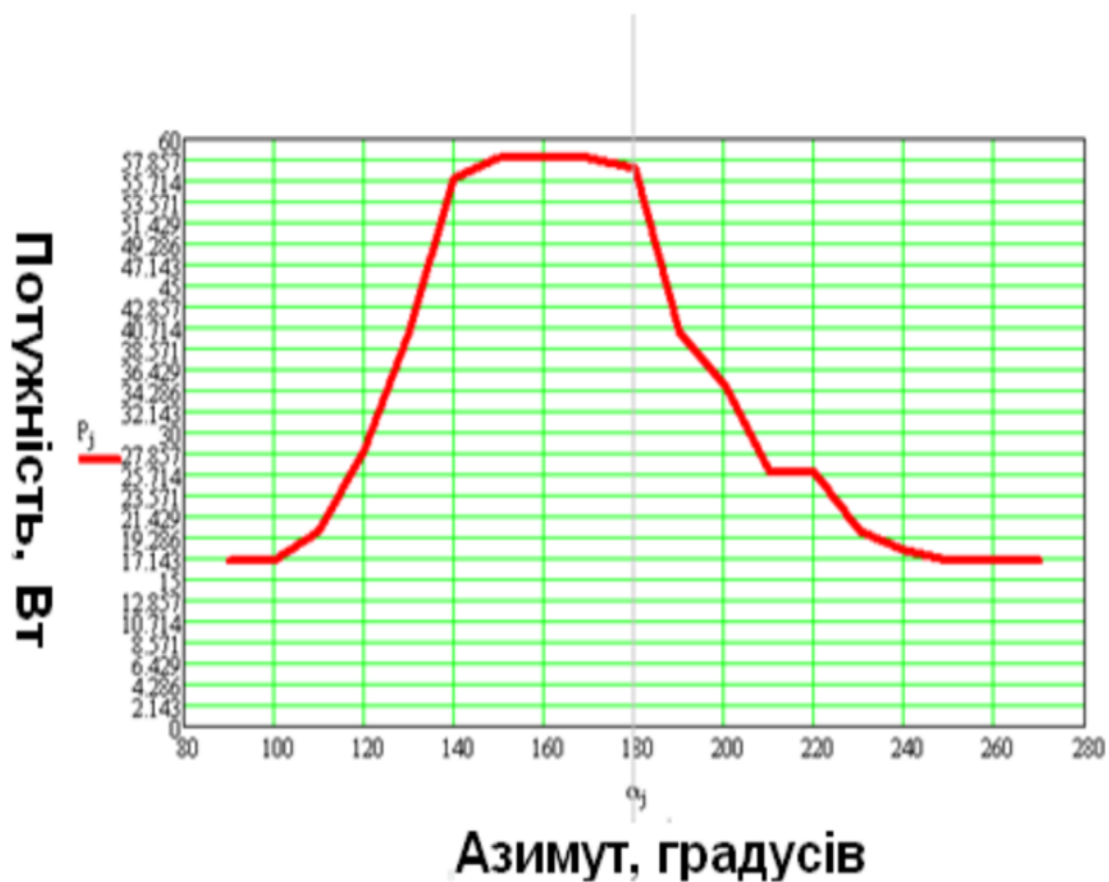


Рис. 3.1 Зміна потужності жорстко закріпленої СФП протягом дня в сонячну погоду

Для підтвердження цього ефекту було проведено експеримент. В цьому експерименті використано дві однакові СФП, параметри яких наведено на рисунку 3.2.



Рис. 3.2 Параметри СФП

Проводилась зміна кута нахилу СФП до горизонту в сонячну погоду. Максимум енергій вдалося отримати тоді, коли площина СФП була перпендикулярна до променів сонця. Залежність генерованої потужності від кута нахилу зображено на рисунку 3.3.

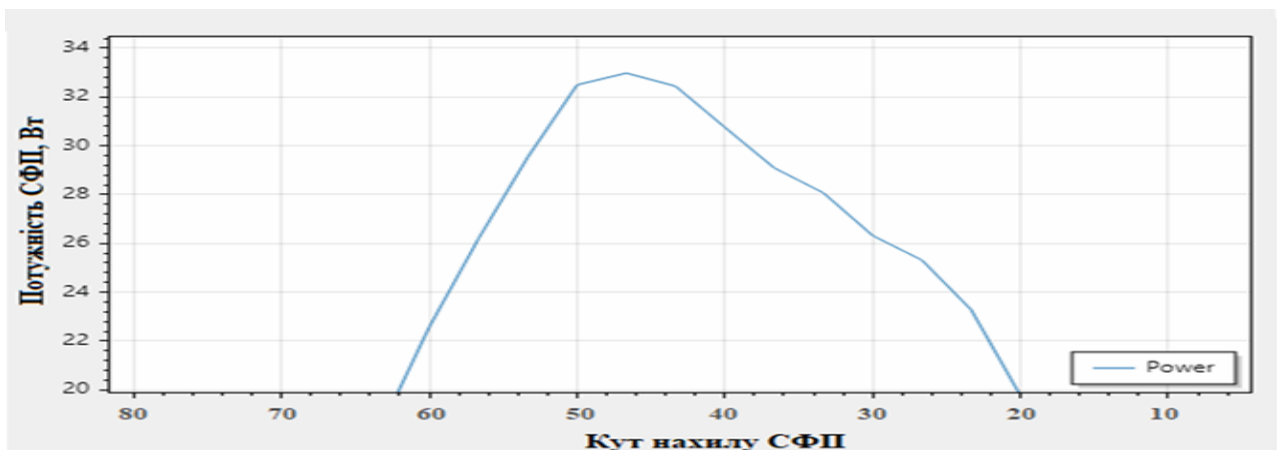


Рис. 3.3 Зміна кута нахилу до горизонту в сонячну погоду

Такий самий експеримент було проведено в хмарну погоду. Залежність зміни кута нахилу до горизонту в хмарну погоду відображено на рисунку 3.4. Максимальна генерація в цьому випадку буде в горизонтальному положенні

СФП. Це зумовлено тим, що атмосфера з хмарами являє собою лінзу, яка розсіює сонячні промені.

Інтенсивність прямого сонячного випромінювання істотно зменшується, і домінуючим стає дифузний компонент сонячної радіації. Дифузне випромінювання надходить на поверхню СФП практично рівномірно з різних напрямків небесної півсфери. За таких умов орієнтація СФП під певним кутом відносно горизонту не забезпечує суттєвої переваги, оскільки на поверхню СФП розсіяні промені вже падають не перпендикулярно.

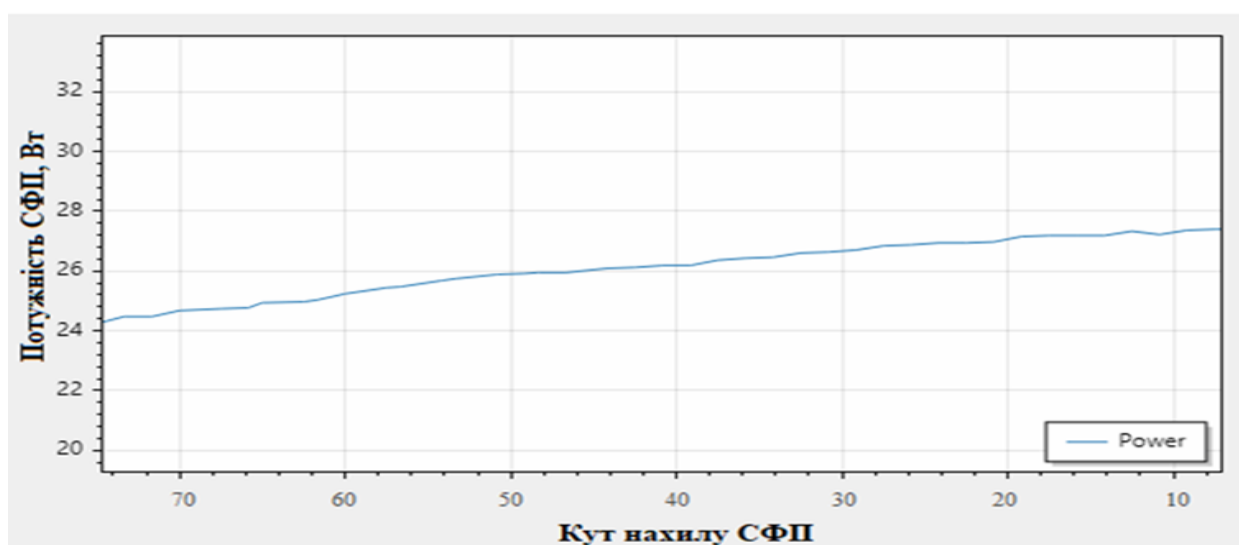


Рис. 3.4 Зміна кута нахилу до горизонту в хмарну погоду

При горизонтальному розташуванні площина СФП охоплює найбільший просторовий кут огляду неба, що забезпечує більш повне залучення дифузної складової випромінювання. Таким чином, у хмарних умовах горизонтальна орієнтація сприяє підвищенню інтегральної потужності, яка генерується, у порівнянні з похилими чи оптимально орієнтованими під кутом до Сонця поверхнями. Це явище має практичне значення для експлуатації сонячних енергетичних систем у регіонах з високою часткою хмарних днів, оскільки вибір кута нахилу СФП впливає на ефективність генерації енергії.

За результатами проведеного експерименту різниця генерованої потужності між горизонтальним положенням та положенням за нормаллю до променів Сонця для СФП потужністю 290Вт монокристалічного типу становить 3Вт. Це дає змогу

побудувати алгоритм керування, який дозволить зменшити втрати електричної енергії на пошук напрямлення на Сонце та зменшить знос рухомих частин під час пошуку напрямку на Сонце при виявленні пахмурного небосхилу.

Для підтвердження ефективності роботи СФП у хмарну погоду в горизонтальному положенні було проведено дослід. В різні дні та часи світлового дня в хмарну погоду було виміряно потужність СФП в двох положеннях. Данні вимірювань приведено в таблиці 3.1. У процесі статистичної обробки експериментальних даних, отриманих для досліджуваних режимів функціонування системи, необхідною передумовою застосування параметричних критеріїв є перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу випадкових величин.

Таблиця 3.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. По нормалі	34.2	35.1	36.8	37.5	34.9	36.3	35.7	37.9	34.5	36.0
2. Горизонтально	42.7	40.0	40.5	40.8	41	41.2	41.5	42	42.5	39.5

З цією метою використано критерій Шапіро - Вілка, який є одним із найбільш потужних критеріїв для малих вибірок. Статистика критерію Шапіро-Вілка визначається як відношення квадрата лінійної комбінації впорядкованих елементів вибірки до суми квадратів відхилень від середнього значення, при цьому вагові коефіцієнти визначаються на основі очікуваних значень порядкових статистик нормального розподілу. Для першої вибірки отримано значення статистики $W_1 = 1.034$, для другої вибірки аналогічно $W_2 = 0.974$. Критичне значення для рівня значущості при $\alpha = 0.05$ та об'єму вибірки $n = 10$ становить $W_{кр} = 0.842$. Оскільки в обох випадках виконується нерівність $W_{кр} < W$, нульова гіпотеза про нормальний розподіл не відхиляється, що дозволяє застосовувати параметричні методи статистичного аналізу.

Далі здійснюється перевірка гіпотези про рівність математичних сподівань двох сукупностей за допомогою критерій Стюдента. Середнє значення похибки

визначалось як арифметичне середнє всіх отриманих відхилень за формулою $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 5.28$, $\varepsilon_i = |P_1(i) - P_2(i)|$. Отримане середнє значення похибки характеризує наявність систематичного зміщення між досліджуваними вибірками. Для оцінки розсіювання похибок відносно середнього значення було обчислено вибіркову дисперсію $D^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2 = 2.051$. Відповідно середньоквадратичне відхилення $s = \sqrt{D^2} = 1.43$. Далі обчислюється коефіцієнт Стюдента $t = \sqrt{n} * \frac{\bar{\varepsilon}}{s} = 11.68$. Число ступенів вільності визначається як $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 18$. Для рівня значущості $\alpha = 0.05$ критичне значення становить $t_{кр} = 2.26$. Оскільки виконується нерівність $t_{кр} > t$, нульова гіпотеза про рівність середніх значень відхиляється. Таким чином, у результаті повного статистичного аналізу встановлено, що обидві вибірки не суперечать нормальному закону розподілу, однак між ними існує статистично значуща різниця середніх значень, що свідчить про їх належність до різних генеральних сукупностей і, відповідно, про відсутність статистичної однорідності.

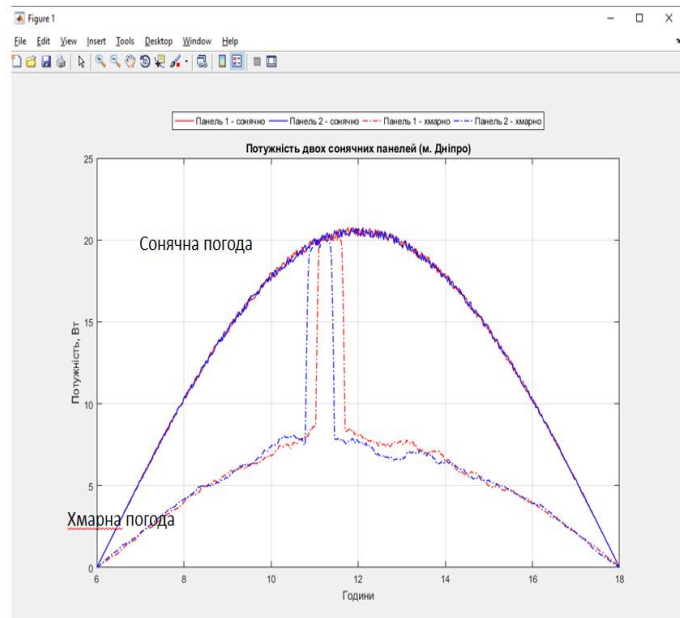


Рис. 3.5 Графіки потужності двох однакових СФП, розташованих на відстані 500м одна від одної

За даними з сервісу NASA в 2025 році з 365 днів усього 42 дня були сонячні без хмар та 177 днів з суцільною хмарністю. Всі інші дні були зі змінною хмарністю. Виходячи з цього фактору можна зробити висновок, що на території Дніпропетровської області є актуальним питанням визначення наявності та рівня хмарності для ефективного керування положенням СФП. Також було проведено дослідження характеру та щільності хмарності на території міста Дніпра.

Як вбачається з рисунка 3.5, в умовах змінної хмарності чи насування фронту частина поверхні може бути затінена хмарами, а в іншій частині буде сонячна погода. Це свідчить про те, що кожна система повинна відстежувати параметри освітленості і приймати рішення з керування конкретно для свого випадку.

3.1.2 Пошук точки максимальної потужності СФП

Пошук точки максимальної потужності (MPP) [71] СФП спрямований на забезпечення найбільш ефективного енергетичного відбору за заданих умов освітлення та температури.

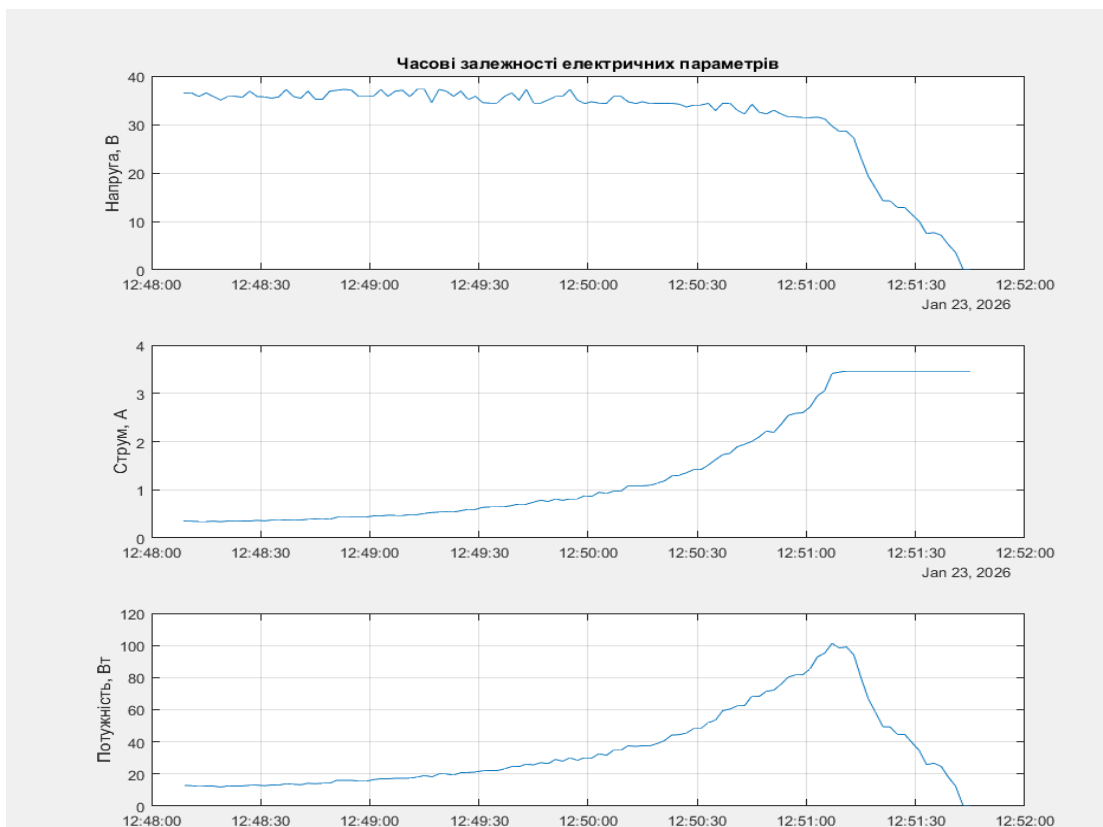


Рис. 3.6 Фізичний процес, який відбувається при перевищенні потужності навантаження вище ніж точка MPP

Подальші дослідження будуть мати хибні результати, якщо енергію відбирати без визначення MPP генерації енергії. Фізичний процес, який відбувається при перевищенні потужності навантаження вище, ніж точка MPP, проілюстровано на рисунку 3.6.

Відповідно до даних графіка СФП потужністю в 290Вт у хмарну погоду з щільною хмарністю в середині літа генерує 100Вт енергії. Така потужність для даних умов освітленості є MPP. При цьому така поведінка характерна не лише для СФП, але й для гальванічних та акумуляторних батарей, асинхронних чи синхронних генераторів, термоелектричних елементів Пельтьє чи інших джерел енергії. При перевищенні цього значення потужність та напруга СФП стрімко починає падати. Водночас струм практично не змінюється. Ці графіки відображають те, що ефективна робота СФП можлива лише поблизу MPP, тоді як відхилення від неї супроводжується суттєвими втратами корисної електричної енергії.

СФП має нелінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ), приклад якої приведено на рисунку 3.7, у межах якої для кожного стану зовнішнього середовища існує єдина робоча точка, що відповідає максимальному значенню вихідної електричної потужності.

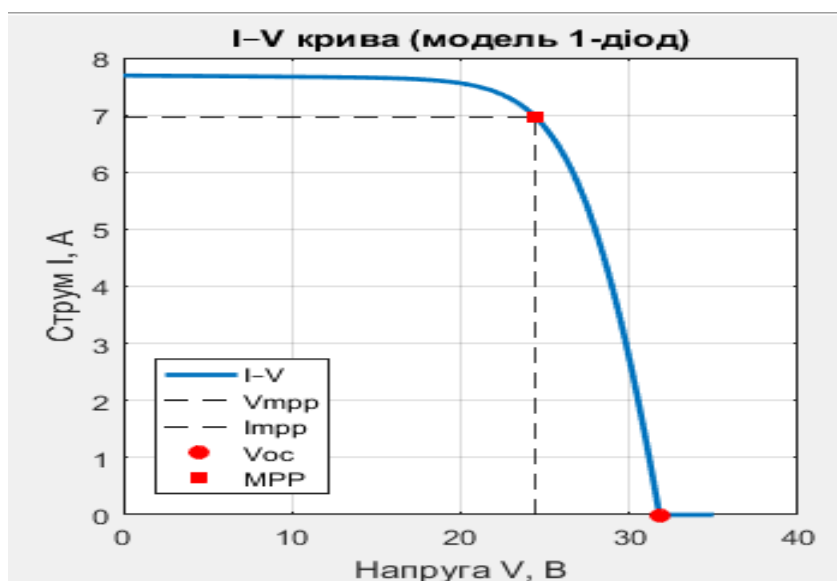


Рис. 3.7 ВАХ СФП за моделлю одного діода з позначенням MPP та точки холостого ходу (V_{oc})

У разі прямого підключення СФП до навантаження робочий режим визначається його параметрами і, як правило, не відповідає цій оптимальній точці, що зумовлює зниження коефіцієнта використання доступної сонячної енергії. Актуальність застосування алгоритмів пошуку МРР зумовлена змінністю умов функціонування СФП. Коливання інтенсивності сонячного випромінювання, температури фотоелектричних елементів та інших зовнішніх чинників призводять до зміщення положення МРР. За таких умов лише активне керування електричним режимом роботи силового перетворювача дозволяє здійснювати адаптацію параметрів системи та підтримувати її роботу в області максимального енергетичного виходу. Отже, реалізація пошуку МРР є принципово необхідною для отримання прогнозованих результатів значення генерованої потужності.

Серед багатьох методів пошуку МРР [71] можна виділити метод збурення та спостереження, метод короткозамкненого струму та метод напруги холостого ходу. Кожен з цих методів базується на використанні певних фізичних властивостей СФП і відрізняється як складністю реалізації, так і точністю визначення оптимального робочого режиму.

Метод збурення та спостереження, відомий у літературі як *Perturb and Observe*, проводить аналіз реакції вихідної потужності СФП на невеликі керуючі збурення робочої напруги. У процесі роботи алгоритм періодично змінює керуючий параметр на малу величину та порівнює потужність, виміряну до і після збурення. Якщо зафіксовано зростання потужності, збурення вважається корисним і подальше регулювання здійснюється в тому ж напрямку. У разі зменшення потужності напрямок регулювання змінюється на протилежний. У такий спосіб робоча точка поступово наближається до МРР. За сталих умов освітлення та температури алгоритм стабілізується поблизу точки МРР, однак, принципова особливість цього методу полягає в неминучих коливаннях робочої точки навколо максимуму, що зумовлено дискретним характером збурень. За швидких змін сонячної радіації метод може тимчасово втрачати коректність оцінки напрямку пошуку, оскільки зміна потужності зумовлюється не лише

керуючим впливом, а й зовнішніми факторами. Роботу алгоритму добре ілюструє потужнісний графік, відображений на рисунку 3.8.

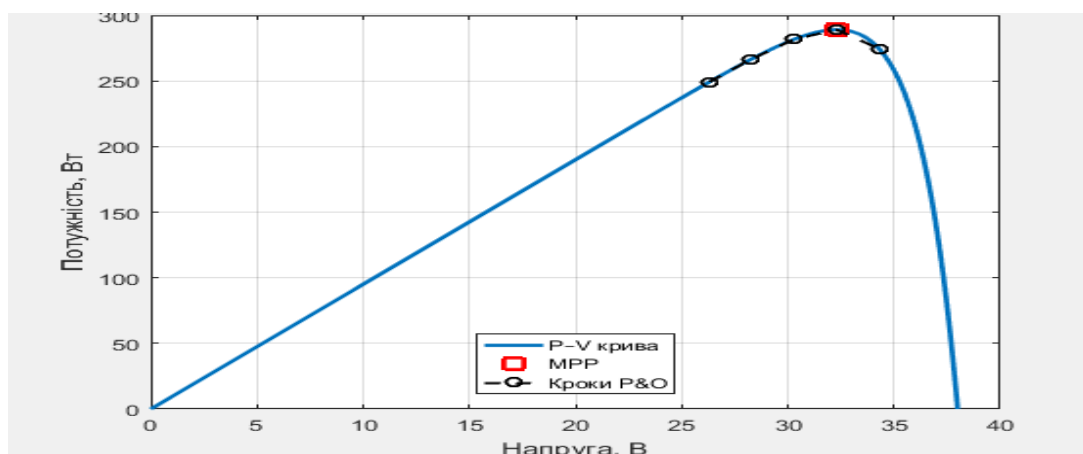


Рис. 3.8 Ілюстрація роботи метода Perturb and Observe

Чорні маркери позначають послідовні кроки алгоритму, коли робоча напруга СФП змінюється дискретно, а вихідна потужність вимірюється після кожного збурення. Якщо внесене збурення призводить до збільшення потужності, напрямок регулювання зберігається, а якщо навпаки, то напрям змінюється. На графіку робоча точка поступово наближається до МРР, проте, навколо нього виникають невеликі коливання, які відображають дискретний характер алгоритму. Попри ці обмеження, метод Perturb and Observe широко використовується завдяки простоті реалізації та відсутності потреби в складних математичних обчисленнях.

У методі короткого замикання струм є майже лінійною функцією інтенсивності сонячного випромінювання, що відображено на графіку на рисунку 3.1, а струм у точці МРР становить певну частку від значення струму короткого замикання. Контролер періодично переводить СФП у режим короткого замикання для вимірювання струму, після чого встановлює робочий режим, орієнтуючись на наперед визначений коефіцієнт пропорційності. Робота алгоритму відображена на потужнісному графіку на рисунку 3.9.

Червона лінія на графіку демонструє струм короткого замикання I_{sc} при нульовій напрузі, тоді як зелена вертикальна лінія відображає струм у точці МРР.

На основі співвідношення між I_{SC} та I_{MPP} контролер може приблизно визначити ефективний робочий струм. Метод дозволяє оцінити максимально можливий струм, але при цьому генерація потужності тимчасово припиняється.

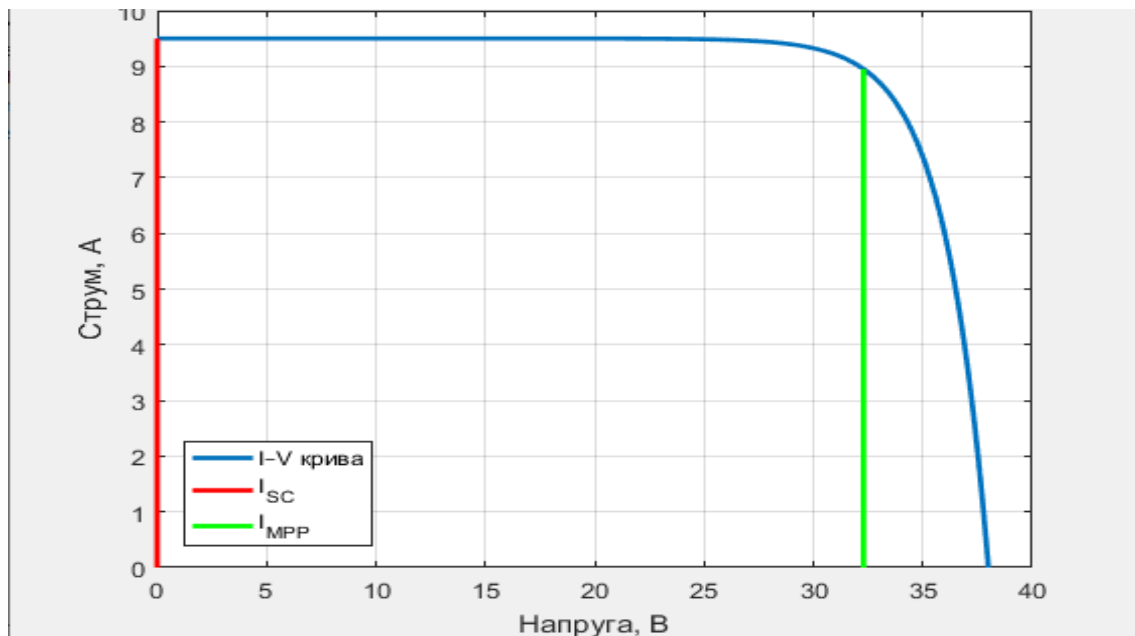


Рис. 3.9 Ілюстрація методу короткого замикання

Основною перевагою такого підходу є простота та мінімальні вимоги до обчислювальних ресурсів. Водночас істотним недоліком методу є необхідність періодичного виведення СФП з нормального режиму роботи, що супроводжується повною відсутністю корисної генерації енергії на час вимірювання. Крім того, співвідношення між струмом короткого замикання та струмом у точці максимальної потужності є лише наближеним і може змінюватися залежно від температури фотоелементів та їх деградації, що обмежує точність методу.

Метод напруги холостого ходу, який також називають методом розімкнутого кола, використовує залежність між напругою холостого ходу СФП та напругою в MPP. Напряга холостого ходу вимірюється за відсутності навантаження і є функцією температури та рівня освітленості. Експериментальні дослідження показують, що напруга в точці MPP становить приблизно сталу частку від напруги холостого ходу для заданого типу СФП. Це значення для конкретної моделі СФП визначається емпірично. Контролер періодично

відключає навантаження, вимірює напругу холостого ходу і на основі емпіричного коефіцієнта встановлює робочу напругу, наближену до оптимальної. Роботу даного метода добре ілюструє потужнісний графік на рисунку 3.10.

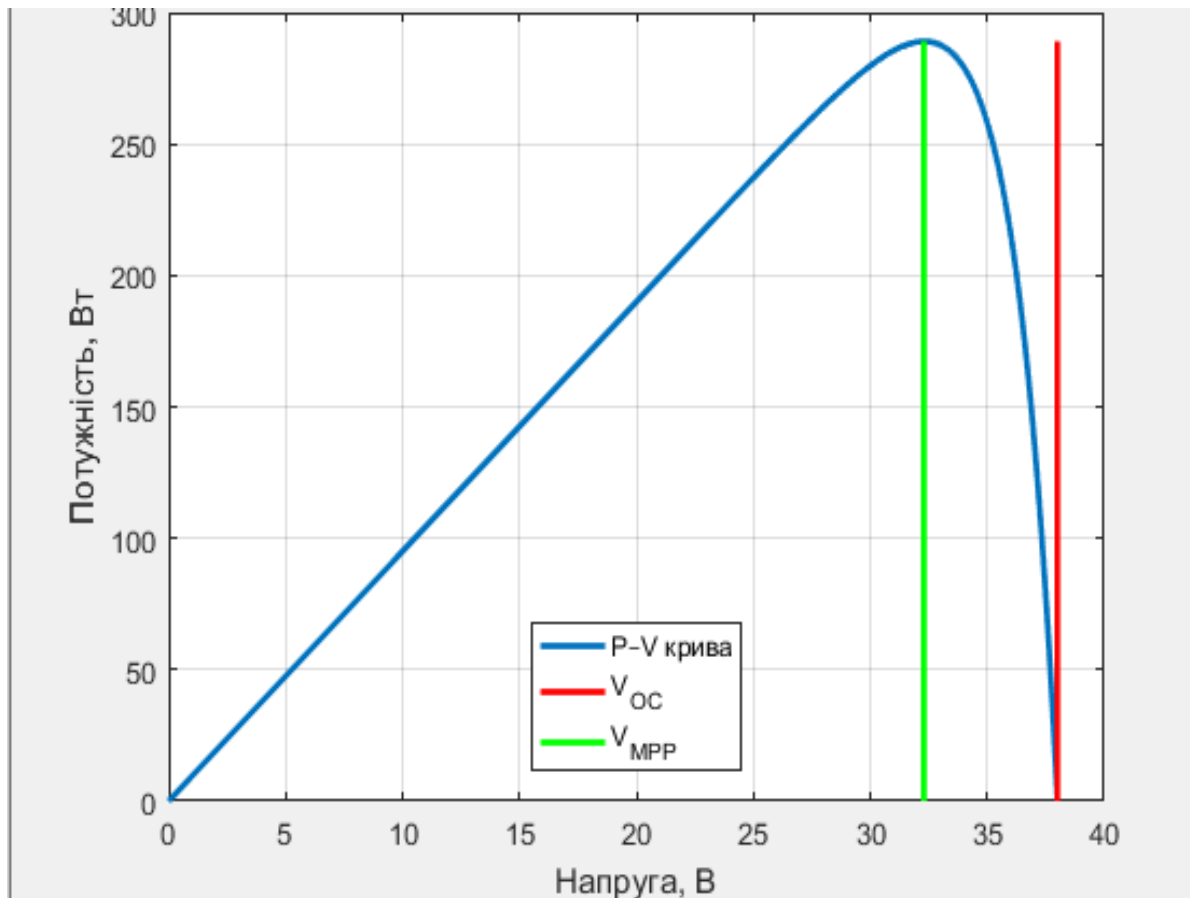


Рис. 3.10 Ілюстрація роботи метода напруги холостого ходу

Червона вертикальна лінія показує напругу холостого ходу V_{OC} , а зелена - робочу напругу в точці MPP, яка визначається як певна частка від V_{OC} . Такий підхід дозволяє приблизно оцінити положення точки максимальної потужності без безпосереднього вимірювання струму, однак, періодичне вимірювання V_{OC} супроводжується короткочасним припиненням генерації електроенергії СФП.

Метод є простим, однак, як і у випадку з методом короткого замикання, потребує тимчасового припинення генерації електричної енергії. Додатковим обмеженням є чутливість коефіцієнта пропорційності до температурних змін, а також деградації СФП, що може призводити до відхилення робочої точки від істинного максимуму потужності.

Порівняльний аналіз розглянутих методів пошуку MPP СФП свідчить про істотні відмінності між ними як за принципом дії, так і за експлуатаційними характеристиками, що безпосередньо впливає на доцільність їх застосування в конкретних фотоелектричних системах. Методи холостого ходу та струму короткого замикання не потребують складних алгоритмічних рішень і можуть бути реалізовані навіть у системах з обмеженими обчислювальними ресурсами. Водночас обидва методи є апроксимаційними за своєю природою, оскільки визначення положення MPP здійснюється на основі фіксованих емпіричних коефіцієнтів, значення яких змінюються залежно від температури, типу фотоелектричних елементів, деградації та їхнього технічного стану.

На відміну від цих підходів, метод збурення та спостереження забезпечує безперервне відстеження положення MPP без необхідності примусового припинення генерації енергії. Алгоритм аналізує залежність вихідної потужності від керуючого впливу, що дозволяє автоматично адаптувати робочий режим СФП до поточних умов освітленості та температури. Незважаючи на наявність коливань робочої точки в усталеному режимі та зниження точності за швидких змін зовнішніх умов, цей метод забезпечує кращий баланс між точністю відстеження, швидкістю та втратами енергії порівняно з методами на основі вимірювання граничних режимів роботи СФП.

З огляду на викладене, для фотоелектричних систем, орієнтованих на стабільну та ефективну роботу в реальних експлуатаційних умовах, доцільним є використання методу збурення та спостереження як алгоритму пошуку MPP. Методи напруги холостого ходу та короткозамкненого струму можуть розглядатися як допоміжні або спрощені рішення, придатні для систем з невисокими вимогами до точності або як засоби початкової оцінки положення MPP.

У системі керування потужністю навантаження в цій роботі буде використано метод пошуку MPP Perturb and Observe. Демонстрація роботи цього метода на моделі наведена на рисунку 3.11.

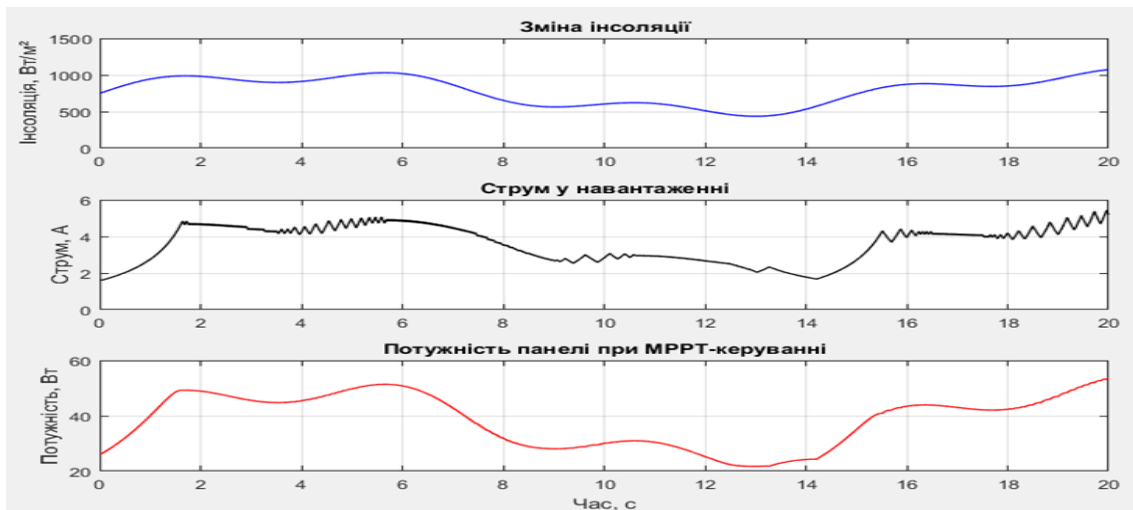


Рис. 3.11 Робота моделі MPP Perturb and Observe

Перший графік - це значення інсоляції, яка збуджує струм у СФП. Другий та третій графіки - це значення струму та потужності після відпрацювання метода пошуку MPP. Струм у навантаженні зазнає незначних коливань, які виникають через безперервний пошук MPP за допомогою невеликих кроків зміни опору навантаження. Ці коливання демонструють як працює метод регулювання. На графіку потужності таких коливань немає, оскільки короткочасне зниження струму компенсується підвищенням напруги. Схема реалізації даного метода приведена на рисунку 3.12.

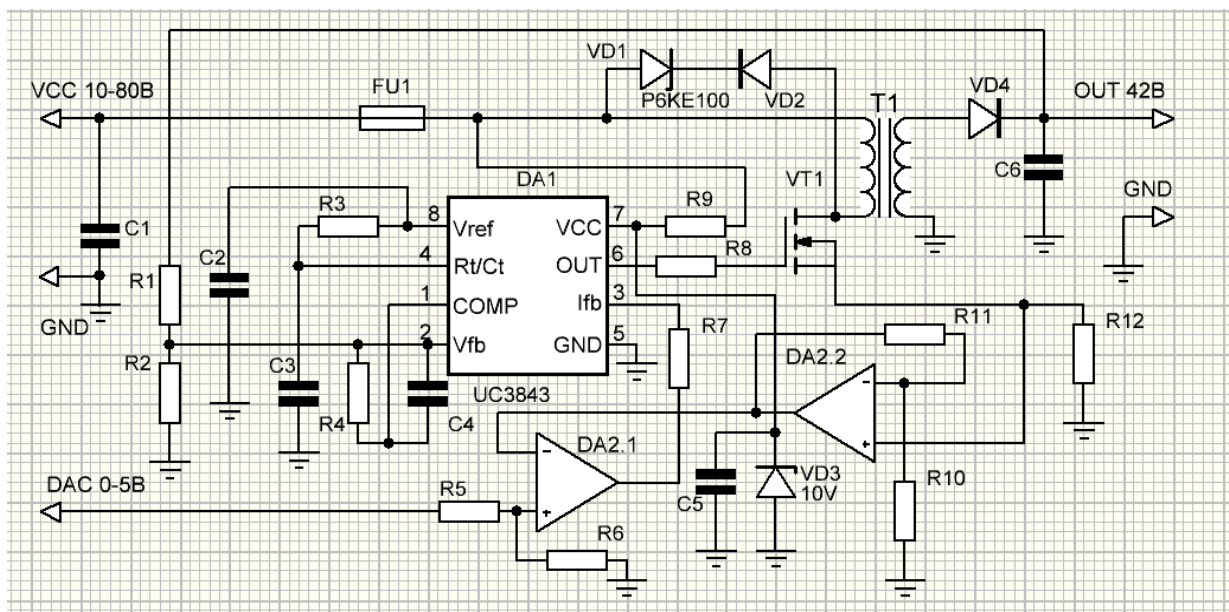


Рис. 3.12 Схема електричної моделі MPP Perturb and Observe

Схема побудована на класичному ШІМ-контролері (ШІМ - широтно-імпульсна модуляція) UC3843 за типовою схемою з документації з модифікацією струмового зворотного зв'язку з введенням схеми на операційних підсилювачах, яка забезпечує регулювання опорної напруги, яку задає керуючий МК.

Сигнал, пропорційний струму навантаження, знімається з вимірювального шунта R12 та на першому етапі подається на операційний підсилювач (ОП) DA2.2, який працює в режимі підсилювача напруги. Це дозволяє масштабувати низькорівневу напругу на шунті до діапазону, зручного для подальшої обробки, а також підвищити завадостійкість струмового каналу. Підсилений сигнал струму порівнюється ОП DA2.1 з опорною напругою, сформованою цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), який приймає налаштування від керуючого МК. ОП при цьому працює в режимі компаратора. Отриманий сигнал помилки подається на вхід струмового контролю UC3843, де впливає на тривалість імпульсів керування силовим ключем. Задачу значення струму формує МК на основі роботи алгоритму МРР. Такий спосіб побудови струмового зворотного зв'язку дозволяє реалізувати програмно керований режим стабілізації струму.

3.2 Методи розпізнавання хмарності та її вплив на генерацію енергії

За результатами проведених досліджень встановлено, що в хмарну погоду більш ефективним є горизонтальне розміщення СФП. Тому є актуальним питання розпізнавання наявності хмар на небосхилі. За наявності суцільної або значної хмарності пряма складова сонячного випромінювання істотно зменшується, а основний внесок у формування сумарної опроміненості робить дифузна складова, яка надходить з усього небосхилу майже ізотропно. За таких умов орієнтація СФП на конкретний напрямок Сонця не забезпечує суттєвого приросту прийнятої енергії, тоді як горизонтальне положення дозволяє максимально ефективно інтегрувати дифузне випромінювання по всій напівсфері неба. Таким чином, горизонтальне розміщення СФП у хмарну погоду є енергетично доцільним та може розглядатися як оптимальний режим роботи трекерної фотоелектричної системи за відсутності домінуючої прямої сонячної радіації.

Сучасні методи оцінки покриття неба хмарами можна класифікувати за принципом вимірювання на оптичні, радіометричні, інфрачервоні, супутникові та радіолокаційні. Оптичні методи аналізують зображення неба, отримані за допомогою цифрових камер або спеціалізованих фотометричних систем, що дозволяє виділяти хмарні області на основі кольірних та яскравісних характеристик. Датчики освітленості порівнюють вимірний рівень інсоляції з теоретичною величиною при ясному небі, що дозволяє визначати ступінь хмарності.

Радіометричні методи включають використання пірометра для вимірювання глобальної сонячної радіації. Зниження вимірюваного потоку порівняно з теоретичним максимумом є індикатором присутності хмар.

Інфрачервоні методи використовують тепловізійні камери для реєстрації температурного контрасту між хмарами та відкритим небом.

Супутникові методи аналізують спектральні знімки у видимому та інфрачервоному діапазонах, що дозволяє оцінювати покриття хмарами на регіональному та глобальному рівнях, хоча тимчасова роздільність таких даних обмежена.

Радіолокаційні методи визначають рівень хмарності за допомогою лазерного та радіолокаційного лідару для визначення наявності та товщини хмарного покриву шляхом реєстрації відбитих сигналів. Крім того, для спрощених оцінок можуть застосовуватися емпіричні методи на основі відносної яскравості неба або аналізу тіней від об'єктів, що дозволяє швидко диференціювати умови хмарності.

Всі ці методи потребують значних обчислень та наявності зв'язку з метео серверами чи наявності дорогого потужного обладнання і як наслідок великих енергетичних затрат, що у випадку малопотужних систем сонячної генерації унеможлиблює їх використання. В рамках цієї роботи було проведено аналіз сигналу потужності в хмарну та сонячну погоду при незмінному навантаженні СФП з генерацією потужності нижче точки MPP для унеможливлення спотворення отриманих результатів.

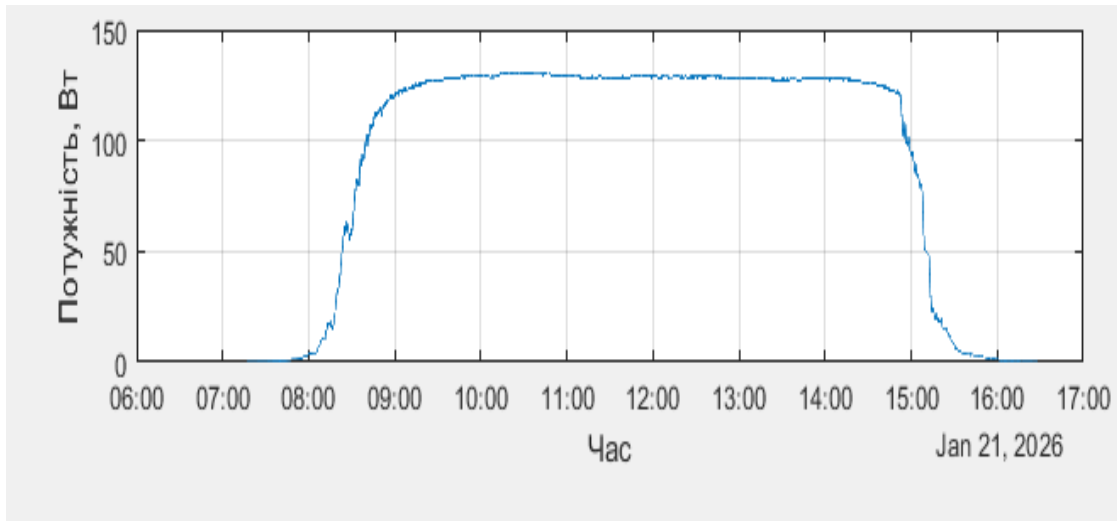


Рис. 3.13 Залежність потужності від часу в сонячну погоду

Результати експерименту були отримані за допомогою вимірювальної системи збору даних, яку описано в 4 розділі. На рисунку 3.13 приведено залежність потужності від часу в сонячну погоду в зимовий період.

Як вбачається з графіка, рівень потужності з 09 до 15 години є без значних змін та пульсацій. На сході та заході є невеликі коливання, які спричинені туманом та доволі довгим шляхом проходження променів через атмосферу у даний період. Улітку такі коливання відсутні.

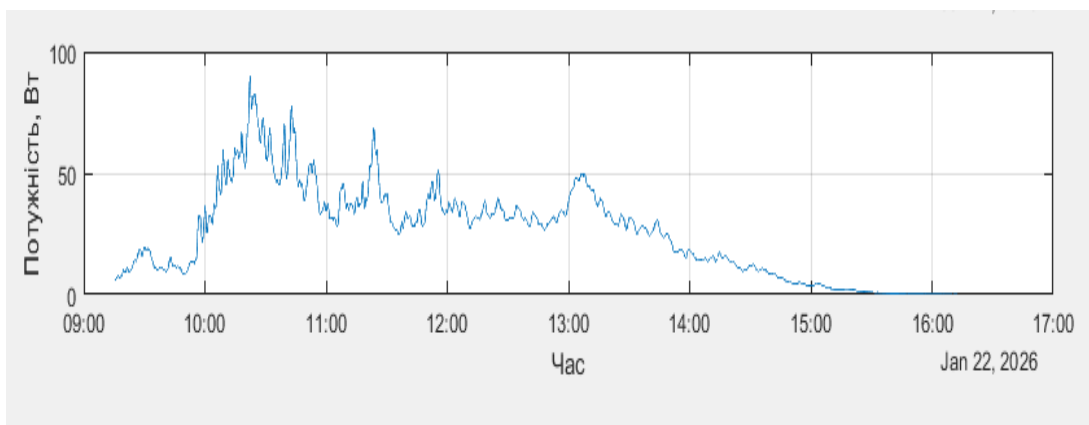


Рис. 3.14 Залежність потужності від часу у хмарну погоду

На рисунку 3.14 приведено залежність потужності від часу в хмарну погоду. З цього графіка без складних математичних розрахунків вбачається наявність коливань з доволі високою амплітудою. Ці коливання спричинені рухом та

неоднорідністю хмар. Данні були отримані в день з суцільною хмарністю без просвітів як у літній час в умовах змінної хмарності. Для наочності було зафіксовано фото небосхилу в цей день, яке зображено на рисунку 3.15.



Рис. 3.15 Небосхил з сукупною однорідною хмарністю

У процесі аналізу експериментальних даних було зафіксовано наявність низькочастотних коливань вихідної потужності СВП та з метою з'ясування природи цих коливань, відокремлення впливу зовнішніх факторів від внутрішніх процесів керування, а також кількісної оцінки їх частотних характеристик, було прийнято рішення виконати спектральний аналіз сигналу потужності та провести класифікацію хмарності.

3.2.1 Спектральний аналіз потужності сонячної генерації для визначення рівня хмарності

Спектральний аналіз сигналів використовується у дослідженні частотної структури та визначенні енергетичних характеристик. Основою спектрального аналізу є перетворення Фур'є [72], яке дозволяє представити будь-який детермінований або стаціонарний сигнал як сукупність гармонічних складових з різними амплітудами та фазами. У цифровій обробці сигналів найбільш поширеним є дискретне перетворення Фур'є (DFT, Discrete Fourier Transform)

[72], яке забезпечує дискретне представлення спектра сигналу, а його ефективна реалізація у вигляді алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT, Fast Fourier Transform) [72] дозволяє обробляти великі обсяги даних із значно меншою обчислювальною складністю.

Для оцінки спектральної щільності потужності сигналу застосовують метод періодограми [73], який дозволяє визначити розподіл енергії сигналу за частотами. Класична періодограма має високу дисперсією оцінок, що може призводити до спотворення результатів. Покращеною версією є метод усередненої періодограми (Welch) [73], який зменшує випадкові коливання спектра шляхом поділу сигналу на перекривні сегменти та усереднення отриманих спектрів.

Альтернативним підходом є використання автокореляційних моделей, таких як AR, MA та ARMA [73], які описують сигнал як лінійну комбінацію попередніх відліків та випадкового шуму, що забезпечує більш точну оцінку спектральних характеристик для коротких або гармонічно структурованих сигналів. У випадках нестационарних сигналів, коли частотний склад змінюється у часі, застосовують Вейвлет перетворення (Wavelet Transform) [73], яке дозволяє одночасно визначати часову та частотну локалізацію енергетичних компонентів сигналу. Крім того, методи на основі автокореляційної функції, такі як підхід Bartlett [73], забезпечують згладжену оцінку спектральної щільності потужності та дозволяють підвищити стабільність оцінок за наявності шуму.

Вибір конкретного методу спектрального аналізу обумовлюється характеристиками сигналу, такими як стаціонарність, довжина та рівень шуму, а також необхідною часовою та частотною роздільністю, що дозволяє забезпечити найбільш точне відображення фізичної структури досліджуваного сигналу.

Вибір FFT [72] для виявлення рівня хмарності обумовлений необхідністю кількісного аналізу коливань сонячної радіації в часі та виділення їх частотних складових, що дозволяє виявити закономірності, які створює хмарний покрив небосхилу.

Сонячне випромінювання, що надходить на поверхню СФП, є сигналом, який змінюється в часі під впливом як повільних добових коливань, так і швидких флуктуацій, спричинених проходженням хмар. FFT дозволяє розкласти цей складний сигнал на сукупність синусоїдальних компонент різних частот, завдяки чому стає можливим визначити співвідношення енергії між низькочастотними складовими, що відповідають повільним змінам освітленості, та високочастотними складовими, які сигналізують про швидкі коливання, які наявні при хмарності.

Таким чином, спектральний аналіз забезпечує об'єктивну оцінку наявності хмар на основі амплітудного спектра сигналу, дозволяє виділити періоди часу з підвищеною мінливістю потужності та порівнювати їх з умовами ясного неба. Крім того, застосування FFT дає змогу обробляти великі обсяги даних, з високою точністю та в реальному часі, що особливо важливо для роботи алгоритму виявлення хмарності на базі системи керування положенням СФП.

Сигнал потужності є дискретним за часом, оскільки вимірюється АЦП МК кожні 2 секунди, що робить застосування класичного DFT неможливим. FFT дозволяє ефективно обчислювати спектр дискретного сигналу, перетворюючи його з часової області у частотну, при цьому забезпечуючи значне скорочення обчислювальної складності порівняно з прямим обчисленням DFT, що важливо для обробки великих обсягів даних або реалізації алгоритму в реальному часі.

FFT дозволяє виділити частотні складові сигналу, які відповідають різним типам коливань сонячної інсоляції. Повільні низькочастотні компоненти зміни значення потужності СФП обумовлені добовим циклом та повільним переміщенням хмарного покриву, тоді як високочастотні компоненти сигналу відображають швидкі, імпульсні коливання потужності, спричинені рухом хмарного покриву. Таким чином, спектральний аналіз через FFT дозволяє кількісно оцінити наявність хмарності, визначити періоди підвищеної мінливості освітленості та коректно інтегрувати ці дані в моделі та алгоритми СФУ. На рисунку 3.16 зображений спектр потужності на основі даних, отриманих з установки, яка була описана вище в хмарну погоду.

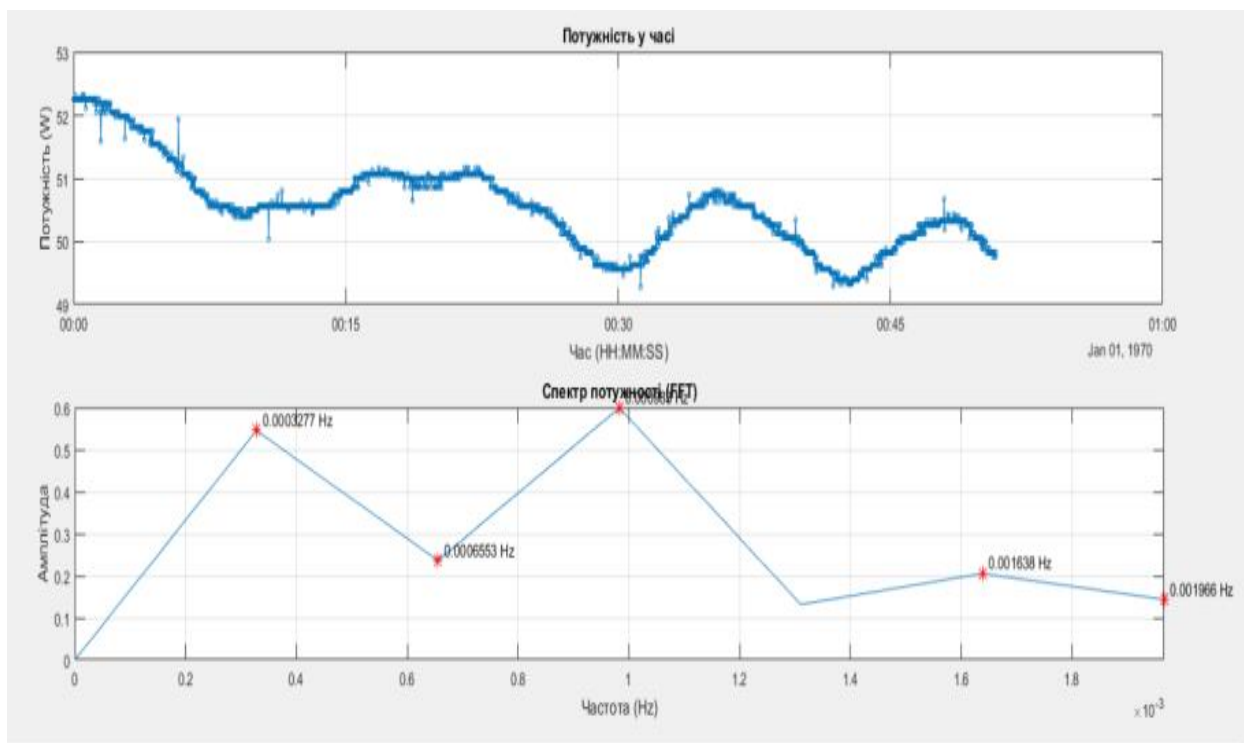


Рис. 3.16 Спектр потужності генерованої СФП

З рисунку вбачається, що спектральна складова при хмарності має низькі частоти, що обумовлено повільним рухом хмар. Також є дуже слабкі значення енергії на високих частотах, які обумовлені процесами на Сонці, оскільки випромінювання Сонця не є стабільним через фізику хаотичності термоядерних реакцій. Ці частоти легко фільтруються за допомогою цифрових фільтрів.

На основі описаного вище розроблено методика виявлення рівня хмарності. У процесі експериментальних досліджень здійснювалася реєстрація N миттєвих значень напруги $U(n)$ та струму $I(n)$ СВП через рівні інтервали часу $\Delta t = 2c$ вищевказаною установкою. На основі виміряних електричних параметрів у кожен n момент часу обчислювалася миттєва електрична потужність $P(n) = U(n) * I(n)$, що дозволило отримати масив із значеннями потужності.

З метою виключення впливу постійної складової та повільного тренду рівня генерації з сигналу потужності формувався центрований часовий ряд $P_S(n) = P(n) - \frac{1}{N} * \sum_{n=0}^{N-1} P(n)$, який використаний для подальшого спектрального аналізу. Центрування дозволяє коректно оцінити амплітуди спектральних

коливань. Центрований сигнал розкладається на спектральні складові за допомогою FFT на комплексну спектральну складову для k біна

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) * e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, k = 0, 1, \dots, N-1. \text{ Далі розраховується амплітуда спектральної}$$

складової $A[k] = \frac{|X[k]|}{N}$, при цьому додатні частоти амплітуди для індексу

спектрального біна $k = 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$ окрім крайніх, множаться на 2

$$A_p[k] = \left\{ \begin{array}{l} A[k], k = 0, \frac{N}{2} \\ 2 * A[k], k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \end{array} \right\} \text{ для врахування енергії віддзеркаленої частини}$$

спектра і далі розраховується частота гармоніки $f_k = \frac{k}{N * \Delta t}$, яка відповідає k біна

спектра. Роздільна здатність спектра $\Delta f = \frac{1}{N * \Delta t}$ залежить від тривалості серії

вимірювань і частоти та показує мінімальний крок між видимими частотами в спектрі. Для виявлення домінантних частот у спектрі обирають біни з

найбільшими амплітудами $A_p[k]$. Повна спектральна енергія сигналу $E_{total} = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}} A_p^2[k]$

на проміжку часу спостережень визначається як сума квадратів амплітуд

одностороннього спектра. Високочастотна енергія $E_{hf} = \sum_{f_k > f_{th}} A_p^2[k]$, яка відображає

внесок швидких коливань через хмарність, визначається як сума квадратів амплітуд тих бінів, частоти яких перевищують порогову частоту f_{th} , значення якої

підбирається для конкретної території емпірично. Відношення високочастотної

енергії до повної є коефіцієнтом хмарності $C = \frac{E_{hf}}{E_{total}}$, де малі значення C

відповідають ясному небосхилу, а великі інтенсивним коливанням потужності, а

значить наявності хмар на небосхилі. Результати дослідження наведено на

рисунку 3.17 у сонячну погоду на сході сонця та при хмарній погоді на рисунку

3.18.

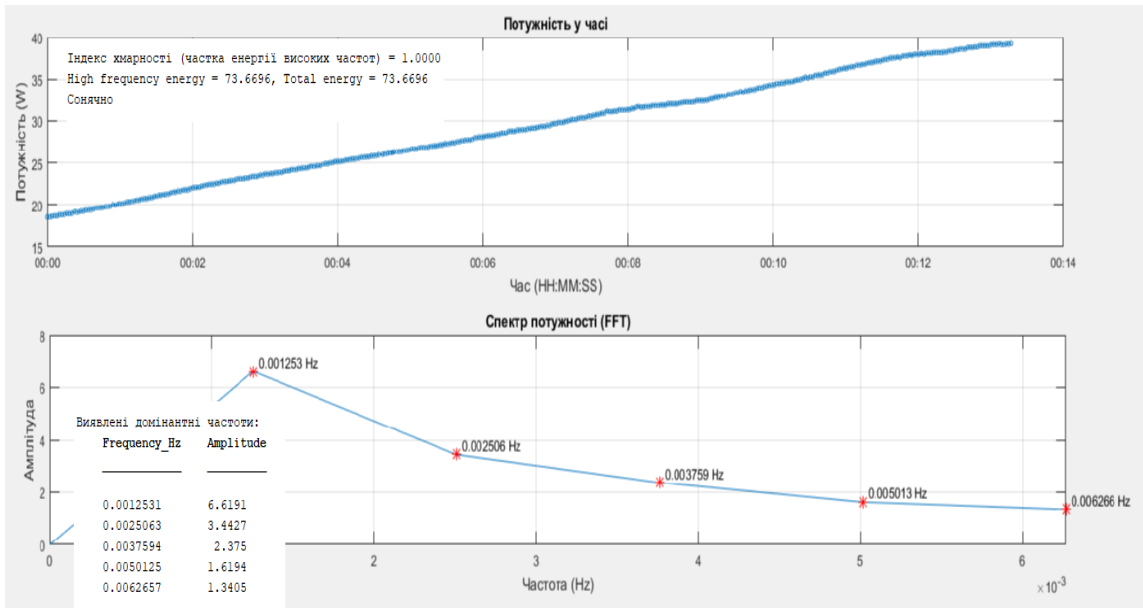


Рис. 3.17 Сонячно, стабільний сонячний потік

Як зображено на рисунку, алгоритм визначає відсутність хмар, навіть на сході Сонця, коли є невеликі коливання потужності за рахунок проходження променів через атмосферу по найдовшому шляху.

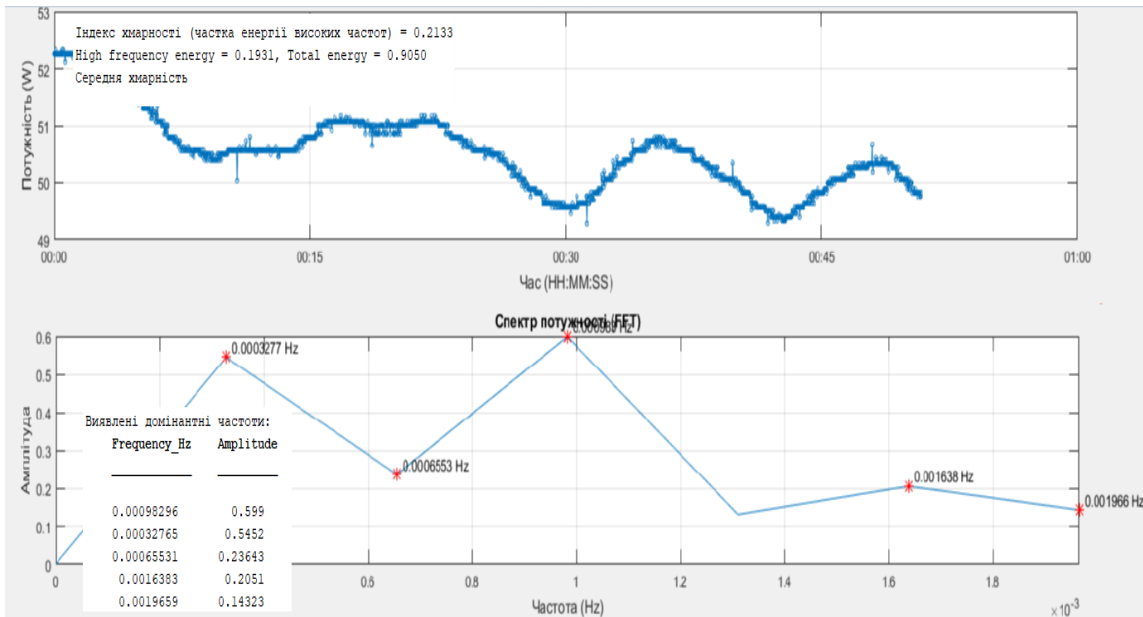


Рис. 3.18 Хмарна погода, змінний сонячний потік

Проходження хмарних утворень спричиняє різкі та нерегулярні зміни освітленості, що призводить до появи виражених високочастотних компонент у спектрі потужності. Це проявляється в зростанні високочастотної спектральної

енергії та відповідно у збільшенні значення коефіцієнта хмарності. Отримані експериментальні результати демонструють чітке розділення режимів сонячної та хмарної погоди за спектральними ознаками, сформованими виключно на основі електричних параметрів СВП. Порівняльний аналіз двох серій експериментів підтверджує працездатність алгоритму та його стійкість до повільних атмосферних ефектів, відмінних від хмарності. Алгоритм не реагує на плавні зміни рівня потужності, викликані добовим рухом Сонця або зміною повітряної маси, і водночас чутливий до швидких флуктуацій, що мають фізичне походження у вигляді переміщення хмар. Це свідчить про адекватний вибір спектральних ознак та доцільність використання коефіцієнта хмарності як інформативного параметра для задач керування положення в просторі СФП.

Узагальнюючи результати експериментальних досліджень, можна зробити висновок, що запропонований підхід забезпечує надійне виявлення хмарності в реальних умовах експлуатації та може бути використаний як основа для побудови алгоритмів оптимального орієнтування та ефективного керування СФП без залучення додаткових метеорологічних вимірювальних засобів.

Таким чином, використання спектрального аналізу дискретного сигналу потужності СВП дозволяє перейти від безпосередніх електричних вимірювань до кількісної оцінки хмарності атмосфери, використовуючи лише дані напруги та струму без залучення додаткових метеорологічних сенсорів. Даний метод визначення рівня хмарності потребує відключення від СФП навантаження на час від 15 до 30 хвилин, що було визначено емпірично на основі зібраних в різні роки та пори року даних. Зазначене призведе до істотних втрат електроенергії. Для вирішення цієї проблеми слід використовувати окрему малопотужну дешеву СФП, яка буде прикріплена до основної зборки і буде працювати як давач інтенсивності сонячного випромінювання. Таке вирішення проблеми зумовлено динамічною невизначеною зміною відбору потужності СФП різним навантаженням. Ще одною проблемою застосування даного алгоритму є те, що він доволі складний для реалізації на базі МК, тому далі буде розглянуто більш простий алгоритм визначення хмарності.

3.2.2 Визначення рівня хмарності на основі статистичного аналізу потужності

Аналіз експериментальних даних реалізовано за допомогою статистичної обробки потужності СФП [74], розрахованої на основі вимірних значень напруги та струму. Вихідними даними є дискретна послідовність вимірювань, що здійснюються з фіксованим часовим кроком $\Delta t = 2c$, унаслідок чого сигнал потужності є дискретизованим у часі. Для кожного моменту часу $t_n = n * \Delta t$, де n номер відліку, миттєва потужність визначається добутком відповідних значень напруги та струму $P[n] = U[n] * I[n]$. Середнє значення потужності, або математичне сподівання вибірки, яка складається з N відліків $P_c = \frac{1}{N} * \sum_{n=0}^{N-1} P[n]$ відповідає усередненій енергії, яку СФП генерує протягом аналізованого інтервалу, і є інтегральною характеристикою рівня освітленості за даних умов. Однак середнє значення саме по собі не несе інформації про стабільність процесу. Два часові сигнали можуть мати однакове середнє значення потужності, але принципово різний характер змін у часі. Саме тому ключову роль у статистичному аналізі відіграє дослідження відхилень потужності від середнього рівня. Для цього треба провести центрування $x[n] = P[n] - P_c$, яке відокремить повільну детерміновану складову при добовому руху Сонця від швидких флуктуацій, які виникають при хмарності.

Кількісна оцінка інтенсивності коливань здійснюється за допомогою дисперсії $D = \frac{1}{N-1} * \sum_{n=1}^N (x[n])^2$, яка відображає загальну енергію флуктуацій у часовій області. За умов ясного неба сигнал потужності змінюється плавно, тому значення дисперсії є малим, у той час як за умов змінної або щільної хмарності значення дисперсії істотно зростає. Дисперсія показує, наскільки сильно значення потужності розосереджені відносно середнього значення потужності, описуючи інтенсивність коливань генерації.

Середньоквадратичне відхилення потужності СФП $\sigma = \sqrt{D}$ показує середню величину відхилення миттєвої потужності від її середнього значення і відображає стабільність генерації за різних умов освітленості.

За допомогою коефіцієнта варіації $C_V = \frac{\sigma}{P_S}$ можна отримати значення частки від середнього рівня генерації, яку становлять флуктуації потужності.

У разі ясної погоди та відсутності хмар потужність СВП змінюється повільно і монотонно, що обумовлено переважно зміною висоти Сонця над горизонтом та атмосферною екстинкцією. Результати моделювання наведено на рисунку 3.19.

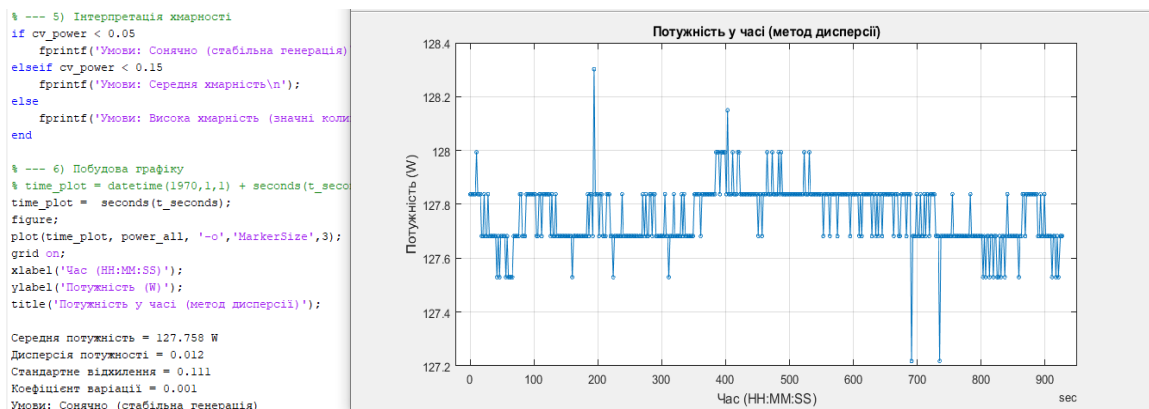


Рис. 3.19 Результат моделювання в сонячну погоду

За таких умов стандартне відхилення потужності є малим порівняно з її середнім значенням, унаслідок чого коефіцієнт варіації набуває значень, близьких до нуля. Експериментально встановлено, що для стабільних сонячних умов коефіцієнт варіації, як правило, не перевищує значення $C_V = 0.01$, що дозволяє інтерпретувати даний режим як режим стабільної генерації без впливу хмарності.

За наявності часткової або змінної хмарності спостерігається поява нерегулярних коливань потужності, спричинених періодичним затіненням СВП хмарами різної оптичної щільності. У цьому випадку середній рівень генерації зберігається, однак, зростає амплітуда флуктуацій відносно середнього значення. Це призводить до помітного збільшення стандартного відхилення і відповідно до

зростання коефіцієнта варіації. Результати моделювання наведено на рисунку 3.20.

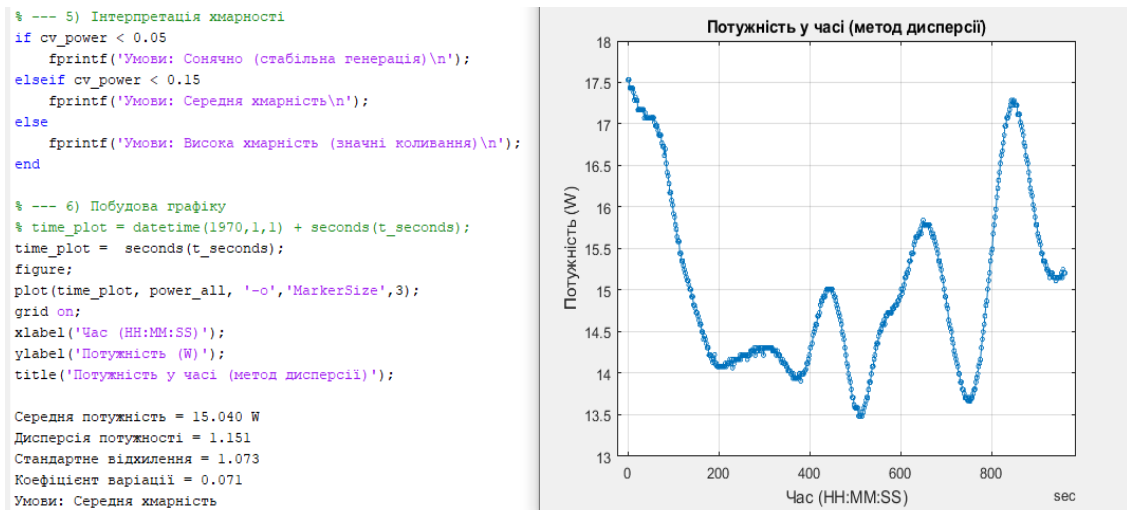


Рис. 3.20 Хмарна погода, змінний сонячний потік

Для таких умов значення коефіцієнта варіації $0.01 < C_v < 0.025$. У разі щільної або швидкоплинної хмарності потужність СВП зазнає значних і швидких змін, що проявляється у вигляді глибоких провалів та різких піків сигналу. За таких умов стандартне відхилення стає співмірним з середнім значенням потужності, а коефіцієнт варіації набуває великих значень. Для цього режиму значення коефіцієнта варіації буде в межах $0.25 < C_v$. Запропоновані порогові значення коефіцієнта варіації підбираються емпірично для конкретного місця розташування СФУ. Такий підхід не потребує використання зовнішніх сенсорів освітленості або метеорологічних даних і може бути інтегрований у системи моніторингу та керування в режимі реального часу. Важливою перевагою методу є його інваріантність до абсолютного рівня потужності, що забезпечується нормуванням стандартного відхилення на середнє значення сигналу.

3.3 Класифікація хмарності

Рівень хмарності суттєво впливає на просторово-часові параметри надходження сонячного випромінювання на поверхність СФП і як наслідок на динаміку електричних характеристик СФП, включаючи положення MPP та необхідність корекції орієнтації СФП у просторі. Хмарність не обмежується лише

описом візуального стану небосхилу, вона є складним інтегральним індикатором фазового стану води, вертикальної стратифікації повітряних мас, рівня турбулентності та інтенсивності процесів конвекції і фронтальної активності. Для розробки алгоритму керування роботою СФУ рівень хмарності доцільно розглядати, використовуючи ступінь перекриття Сонця хмарами та динаміку змін освітленості.

При безхмарному небі прямий потік сонячного випромінювання досягає активної поверхні СФП без суттєвих перешкод, забезпечуючи максимальну потужність і мінімальні коливання електричних параметрів. Фото безхмарного неба приведено на рисунку 3.21.



Рис. 3.21 Безхмарне небо

При безхмарному небі небосхил має блакитний або насичено синій колір, атмосфера має невелику кількість пари чи пилу, яка практично не впливає на проходження сонячного випромінювання, унаслідок чого втрати енергії зумовлюються переважно молекулярним розсіюванням і газовим поглинанням, а потік прямої сонячної радіації досягає поверхні СФП з мінімальним ослабленням і високою часовою стабільністю. Для СФП в таких умовах положення МРР стабільне протягом усього дня, а орієнтація СФП під прямим кутом до сонячних променів забезпечує ефективну генерацію енергії. Безхмарний стан небосхилу є

еталоном оптимального освітлення, необхідного для калібрування вимірювальної системи та коректного аналізу роботи СФП.

Змінна хмарність формує перехідні умови, коли небосхил покривають окремі хмари різної висоти та оптичної товщини. Фото неба з змінною хмарністю приведено на рисунку 3.22.



Рис. 3.22 Змінна хмарність

Візуально це проявляється як поєднання світлих ділянок блакитного неба з тонкими білими або світло-сірими хмарними структурами, які рухаються під дією вітрових потоків. У таких умовах пряма сонячна радіація переривається періодичними затемненнями, що призводить до швидких коливань струму та напруги СФП. Високі тонкі білі хмари, що складаються переважно з дрібних кристалів льоду або водяних крапель, розсіюють сонячне світло, зменшуючи амплітуду коливань МРР, одночасно підвищуючи стабільність сумарного потоку розсіяного випромінювання. У таких умовах системи трекінгу залишаються ефективними, оскільки точне слідкування за Сонцем дозволяє зберегти максимальний внесок прямої складової, навіть під час короточасних перекриттів Сонця хмарою.

Суцільна хмарність або інтенсивно темні хмари формують умови, коли пряма сонячна радіація майже повністю блокується, а СФП отримує енергію переважно від розсіяного світла. Фото суцільно хмарного неба приведено на рисунку 3.23.



Рис. 3.23 Суцільна хмарність

Візуально це проявляється як рівномірний сірий, темно-синій або майже чорний небосхил без чіткого положення Сонця. Оптична товщина хмарного шару та концентрація водяних крапель у ньому визначають рівень затемнення. Чим більша товщина хмарного шару, тим нижча і стабільніша сумарна освітленість, а коливання МРР зменшуються. У таких умовах точне орієнтування СФП на Сонце не має великого впливу, і при цьому екстремальне слідкування системою за Сонцем неефективне, що було доведено та досліджено раніше.

Темні грозові щільні хмари практично повністю затримують проходження прямого випромінювання від Сонця, унаслідок чого освітленість поверхні СФП визначається переважно розсіяною складовою сонячної радіації, інтенсивність якої є істотно нижчою та нестабільною в часі, що призводить до різкого зменшення вихідної потужності СФП та зміщення її МРР. Для низьких щільних

шаруватих і грозових хмар пряма сонячна радіація практично відсутня. Оптична товщина настільки велика, що прямий пучок повністю поглинається і багаторазово розсіюється в об'ємі хмари. Тому в цих умовах на поверхню СФП надходить лише розсіяна радіація, і просторова орієнтація СФП неефективна.

Середні хмари ослабляють пряму іррадіацію, але вона не зникає повністю. Частина фотонів проходить крізь хмарний шар без багаторазового розсіяння, утворюючи залишкову пряму складову з низькою інтенсивністю, зазвичай меншою, ніж розсіяна складова. В цьому випадку просторова орієнтація СФП теж неефективна.

Лише для високих тонких хмар пряма іррадіація дійсно зберігається в значній мірі. Вони мають малу оптичну товщину, тому пряма складова ослаблюється не критично, а розсіяна радіація додається до неї, згладжуючи флуктуації потужності. Саме в цьому випадку просторова орієнтація СФП залишається ефективною.

Динаміка хмарного покриву є ще одним ключовим фактором. Рух хмар по небу створює часові варіації освітленості від десятків секунд до хвилин, що прямо впливає на коливання МРР та ефективність роботи системи. У безхмарні дні коливання відсутні, у дні зі змінною хмарністю вони проявляються як короткі спади і підйоми потужності, а при суцільному хмарному покриві коливання зменшуються до рівня розсіяного світла.

Отже, класифікація хмарності дозволяє виконувати ефективне виявлення типу хмарного покриву, що забезпечує можливість розпізнавання режимів з повною відсутністю прямої іррадіації, її частковою наявністю або домінуванням прямої складової, завдяки чому система керування буде приймати правильне рішення щодо вибору алгоритму керування орієнтацією СФП та режиму роботи пошуку МРР залежно від поточних атмосферних умов.

3.4 Обґрунтування вибору оптимального значення кута азимута СФП при екстремальному слідкуванні за Сонцем

Алгоритм екстремального слідкування СФП за Сонцем можна оптимізувати за рахунок не постійного, а дискретного слідкування. Така задача розглядається з

позицій фізичних закономірностей поширення сонячного випромінювання, геометрії його падіння на поверхню СФП та особливостей роботи сучасних СФП. Основна увага зосереджена на встановленні такого допустимого діапазону кутових відхилень від перпендикулярного положення, при якому зменшення вихідної електричної потужності є неістотним, що дозволяє знизити вимоги до точності та частоти корекції положення СФП в трекерних системах. Вихідною фізичною передумовою аналізу є той факт, що кількість сонячної енергії, яка перетворюється СФП, визначається щільністю потоку сонячного випромінювання, що падає на його активну поверхню. Залежність ефективної іррадіації від кута падіння сонячного випромінювання на поверхню СФП описується формулою 3.1, відповідно до якої проєкція потоку випромінювання I_0 на площину поверхні зменшується пропорційно косинусу кута θ між напрямком променів та нормаллю до цієї поверхні. Більш детально було описано у 2 розділі роботи.

$$I_{ef} = I_0 * \cos \theta \quad (3.1)$$

Таким чином, максимальне значення ефективної іррадіації досягається при $\theta = 0$, тобто за умови перпендикулярного падіння випромінювання. Електрична потужність, що генерується СФП, у спрощеному вигляді пропорційна ефективній іррадіації та може бути представлена співвідношенням, формула 3.2.

$$P_{ef} = \eta * S_{СФП} * I_0 * \cos \theta, \quad (3.2)$$

де η - коефіцієнт корисної дії СФП, $S_{СФП}$ - площа його активної поверхні.

Таким чином, зміна потужності при кутовому відхиленні СФП від нормалі визначається лише значенням косинуса кута падіння сонячного випромінювання. Важливою особливістю залежності є її слабка нелінійність у діапазоні малих кутів. Для відносно невеликих відхилень від перпендикулярного положення, припустимо, при $\theta = 5^\circ$ значення $\cos \theta = 0.996$, при $\theta = 10^\circ$ значення $\cos \theta = 0.985$, а при $\theta = 15^\circ$ значення $\cos \theta = 0.966$. З цього слідує, що в практичних умовах експлуатації СФП невеликі кутові відхилення не призводять до істотного зниження миттєвої вихідної потужності.

Додатково слід враховувати, що рух Сонця по небосхилу відбувається з відносно малою кутовою швидкістю, яка становить приблизно 15° за годину. За таких умов навіть при повній відсутності корекції положення СФП протягом кількох хвилин кутове відхилення від оптимального положення залишається малим, а відповідне зменшення іррадіації перебуває в межах кількох відсотків. Вимога безперервного механічного слідкування за Сонцем з високою кутовою точністю є надмірною з точки зору енергетичної ефективності. Крім геометричних чинників, на залежність вихідної потужності від кута падіння випромінювання впливають і конструктивні особливості сучасних сонячних фотомодулів. Антивідбивні покриття, текстурування поверхні кремнієвих елементів, а також багат шарові захисні структури сприяють частковій нормалізації напрямку падаючого випромінювання та підвищують поглинання світла в широкому кутовому діапазоні. Унаслідок цього реальна кутова характеристика СФП часто є більш пологою, ніж теоретична косинусна залежність, особливо за наявності дифузної складової сонячного випромінювання, що проілюстровано на рисунку 3.24.

З урахуванням наведеного доцільно вводити поняття допустимого кутового відхилення при θ_{don} , яке визначається з умови обмеження допустимих втрат потужності. Якщо задати граничне значення відносних втрат ΔP_{don} , то відповідний кут може бути визначений із співвідношення $\cos \Delta \theta_{don} \geq 1 - \Delta P_{don}$.

Для типових інженерних задач допустимі втрати на рівні 2-3% відповідають кутовим відхиленням порядку $10-15^\circ$.

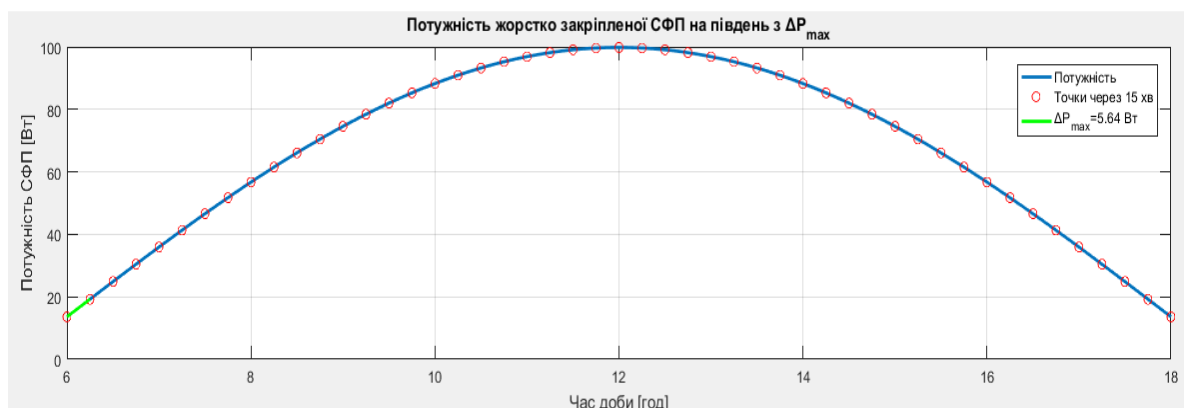


Рис. 3.24 Кутова характеристика СФП

Саме цей діапазон може розглядатися як робочий інтервал екстремального слідування, у межах якого відхилення від ідеального перпендикулярного положення не призводить до суттєвого зменшення енергетичної віддачі СФП. Отримані результати мають важливі практичні наслідки для побудови алгоритмів керування трекерними системами. Замість реалізації безперервного механічного повороту СФП можливо застосовувати дискретні або квазібезперервні алгоритми корекції з фіксованим кроком, величина якого визначається швидкістю руху Сонця та допустимим кутовим відхиленням. Такий підхід дозволяє зменшити енергоспоживання приводів, знизити механічний знос та підвищити загальну надійність системи, зберігаючи при цьому практично максимальну генерацію електричної енергії. Таким чином, обґрунтування кута повороту СФП при екстремальному слідуванні базується на особливостях руху Сонця та конструктивних властивостях сучасних СФП. Запропонований підхід дозволяє трактувати екстремальне слідування не як задачу ідеального геометричного вирівнювання, а як задачу підтримання орієнтації СФП в межах допустимого кутового інтервалу, оптимального з точки зору енергетичної ефективності та технічної реалізації.

3.5 Обґрунтування порогових значень інформаційного критерію класифікації хмарності для адаптивної зміни режимів керування положенням СФП

З метою обґрунтування порогових значень для класифікації типу хмарності проведено аналіз закономірностей зміни потужності СФП в часі для різних погодних умов протягом світлового дня, рисунок 3.25. За результатами аналізу встановлено, що за умов ясної погоди значення потужності в різних часових точках аналізованого інтервалу часу має незначний розкид та низькочастотну трендову складову, вплив якої зменшується внаслідок центрування даних при обчисленні коефіцієнта варіації.

За умов змінної хмарності відбувається зниження середнього рівня потужності та збільшення розкиду значень у межах аналізованого інтервалу часу.

У випадку суцільної хмарності характерним є зростання розкиду потужності, що призводить до збільшення значення ковзного коефіцієнта варіації.



Рис. 3.25 Статистичне обґрунтування меж між станами хмарності

Порогові значення інформаційного критерію класифікації хмарності для адаптивної зміни режимів керування положенням СФП визначено на основі статистичного аналізу експериментальних даних. На рисунку 3.26 приведено статистичне обґрунтування меж між станами хмарності.

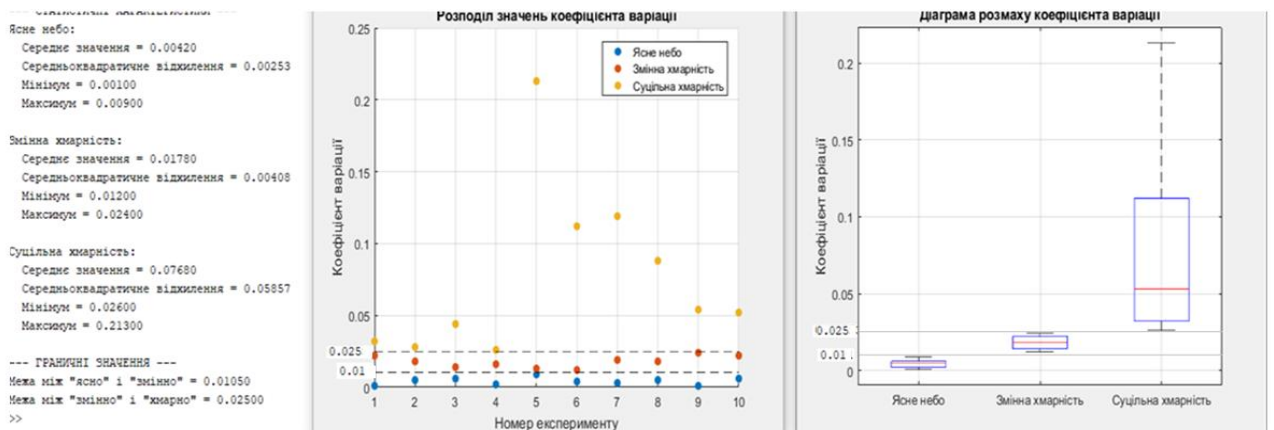


Рис. 3.26 Статистичне обґрунтування меж між станами хмарності.

Для кожного стану (ясно, змінна хмарність, суцільна хмарність) були визначені діапазони значень, при цьому встановлено відсутність перекриття між інтервалами суміжних класів. Це свідчить про статистичну відокремленість вибірок. Межі між класами визначалися як середини між максимальним значенням попереднього класу та мінімальним значенням наступного, що забезпечує об'єктивне та стійке розділення режимів.

Для встановлення умови зміни тактики керування положенням СФП системою керування на основі запропонованого інформаційного критерію проведено дослідження залежності потужності СФП від ковзного коефіцієнта варіації для різного типу хмарності. При цьому розглянуто два випадки: за умови постійного стеження СФП за Сонцем та за умови статичного горизонтального положення СФП. Результат моделювання приведено на рисунку 3.27.

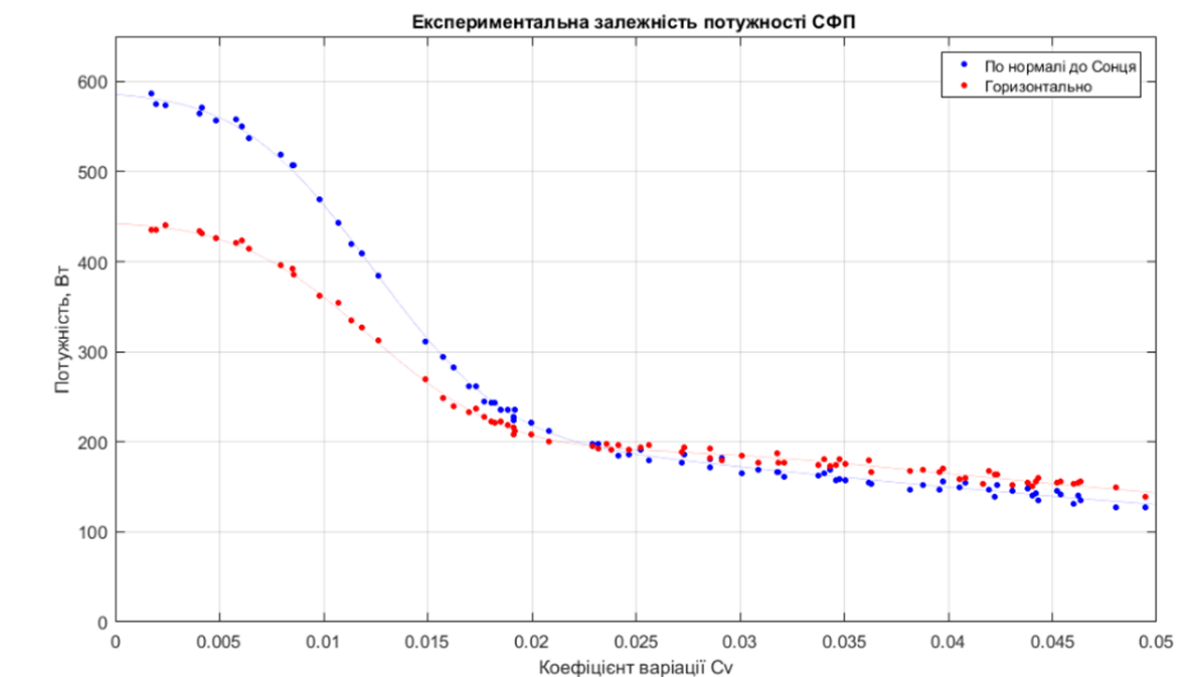


Рис. 3.27 Дослідження залежності потужності СФП від ковзного коефіцієнта варіації для різного типу хмарності

Під час дослідження залежностей встановлено, що по мірі зростання хмарності та збільшення ковзного коефіцієнта варіації потужність зменшується нелінійно в обох випадках. Але головне, що при певному значенні ковзного коефіцієнта варіації потужність СФП, що знаходиться в статичному

горизонтальному положенні, починає виробляти більшу потужність, ніж СФП, що рухається за Сонцем. Саме це значення інформаційного критерію визначає умову зміни тактики керування положенням СФП: при перевищенні значення система переходить від стеження за Сонцем до розміщення СФП в статичному горизонтальному положенні.

3.6 Алгоритм визначення станів хмарності за ковзним коефіцієнтом варіації потужності СФП.

Визначення стану хмарності виконується за значенням ковзного коефіцієнта

варіації потужності СФП
$$C = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n (P_i - \frac{1}{N} * \sum_{j=1}^n P_j)^2}}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n P_i}$$
, де P -миттєва потужність, N -

кількість елементів вибірки. Алгоритм визначення стану хмарності приведено на рисунку 3.28.

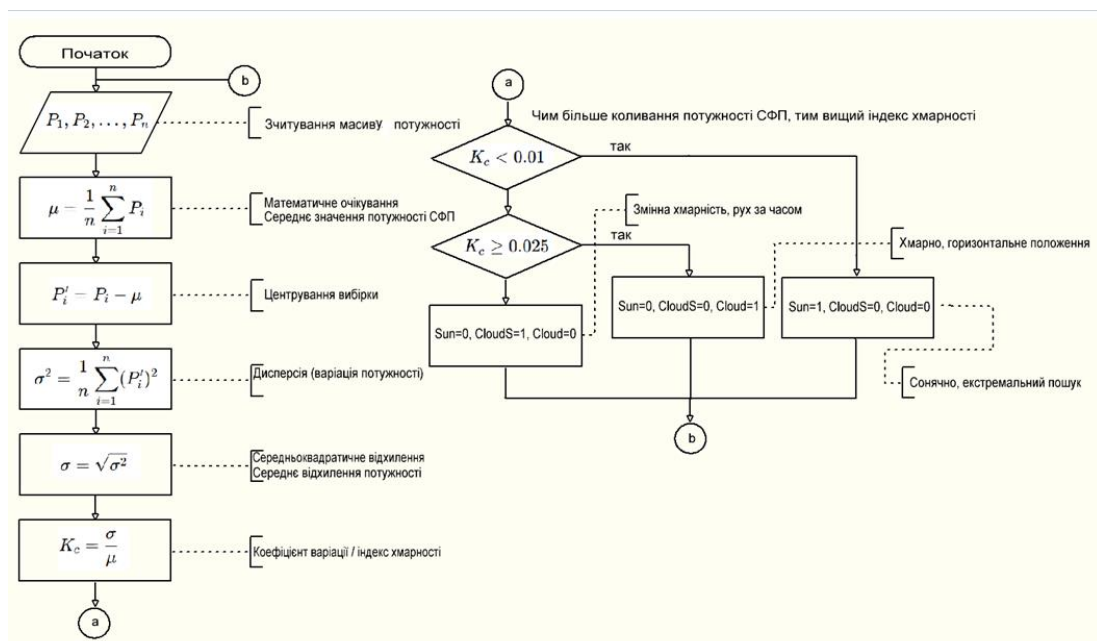


Рис. 3.28 Алгоритм визначення рівня хмарності

Основна аналітична частина алгоритму полягає в ковзній обробці даних за часовими інтервалами фіксованої тривалості. Починаючи з першої часової точки, формується підмножина значень потужності, що належать поточному 15-хвилинному інтервалу. Для кожного такого інтервалу обчислюється математичне

очікування потужності як середнє арифметичне значень у інтервалі. Сигнал центрується, при цьому від кожного значення масиву потужності вираховується математичне очікування.

Далі визначається дисперсія як середнє квадратичне відхилення від середнього значення. На основі дисперсії розраховується середньоквадратичне відхилення, яке виділяє амплітуду флуктуацій потужності всередині інтервалу.

Індекс хмарності визначається як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення потужності в межах відповідного інтервалу. Фактично коефіцієнт хмарності є коефіцієнтом варіації, що є безрозмірною величиною і дозволяє оцінювати відносний рівень нестабільності генерації незалежно від абсолютного рівня потужності.

Коефіцієнт варіації потужності, що генерується СФП, змінюється в діапазоні 0-0.01 у сонячну погоду, в діапазоні зміни значень від 0.01 до 0.025 в умовах змінної хмарності та в діапазоні зміни значень від 0.025 до 0.8 у хмарну погоду, що дозволяє ідентифікувати тип хмарності та врахувати цей параметр при автоматичному керування положенням СФП.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі класифіковано стани хмарності за рівнем освітленості, характером розподілу сонячного випромінювання та тривалістю змін погодних умов. Визначено, що ясна погода з мінімальною хмарністю дозволяє СФП працювати в активному режимі трекінгу, коли СФП постійно орієнтується на розрахункове положення Сонця, забезпечуючи максимальний збір прямого сонячного випромінювання. Визначено, що в разі часткової або суцільної хмарності доля прямого сонячного випромінювання зменшується, а розсіяне випромінювання стає домінуючим, що знижує ефективність постійного механічного коригування положення СФП.

Надмірна активність при пошуці напрямку на Сонце при хмарності призводить до додаткових витрат енергії на переміщення, зношування приводів мотопідвісів та скорочення терміну їх експлуатації без реального приросту

генерації. Ці спостереження стали підставою для розробки алгоритму, що коригує частоту та амплітуду рухів СФП залежно від оцінки хмарності.

Доведено, що постійне слідування за Сонцем не є оптимальним. Водночас доведено, що ефективним є коригування положення СФП у просторі дискретно за часом. Визначено оптимальний інтервал коригування, який забезпечує максимальний баланс між приростом корисної енергії та витратами на обслуговування.

Встановлено, що підтримання роботи СФП у МРР є критично важливим, оскільки відхилення від МРР навіть на невеликі величини здатне знизити ефективність генерації на десятки відсотків. Для забезпечення роботи в МРР досліджено алгоритми пошуку МРР, які враховують реальні характеристики СФП та умови освітленості, включаючи коливання інсоляції через проходження хмар. Окремо розглянуто питання впливу хмарності на ефективність роботи СФП.

У розділі 3 обґрунтовано використання ковзного коефіцієнта варіації як інформаційної ознаки для вибору режиму керування положенням СФП. Для оцінки рівня хмарності за змінами миттєвої потужності використано метод статистичного аналізу потужності з використанням експериментально отриманих значень напруги та струму. Центрований сигнал потужності обробляється з використанням дисперсії та стандартного відхилення, що дозволяє визначити коливання потужності відносно середнього значення, а коефіцієнт варіації використовується як інтегральний показник нестабільності генерації потужності СФП. На основі цього показника встановлено порогові значення, які дозволяють класифікувати погодні умови на ясні, змінної хмарності та хмарні, що впливає на алгоритм визначення ефективного положення СФП у просторі. На основі експериментальних даних для сонячної погоди встановлено, що ефективно положення СФП у просторі є перпендикуляр сонячних променів до площі СФП, а при високій хмарності встановлено, що доцільно підтримувати горизонтальне положення, яке забезпечує максимальну сумарну генерацію при розсіяній радіації. Додатково проведено аналіз частотних складових значення потужності для підтвердження наявності низькочастотних коливань, обумовлених

проходженням хмар, і для виділення домінантних частот коливань. На основі спектрального аналізу визначено періоди зміни потужності, що дозволяє оптимізувати швидкість реакції трекеру і алгоритми керування. Застосування FFT дозволило розкласти дискретний сигнал потужності на частотні компоненти, обчислювати енергію високих частот та загальну енергію сигналу. Індекс хмарності для метода FFT обчислено як відношення енергії високочастотних складових сигналу сонячної радіації до повної енергії спектра, що дозволяє кількісно оцінити ступінь короткочасних флуктуацій інсоляції.

Результати експериментів показали, що система успішно визначає наявність і відсутність хмар, може підтримувати роботу в MPP. Умови тестування включали різні години доби та дня року, що дозволило оцінити ефективність алгоритмів на сході та заході Сонця, а також у періоди різної хмарності. Розроблений підхід щодо керування положенням СФП дозволяє не лише підтримувати максимальну генерацію в конкретний момент, але й прогнозувати ефективні положення СФП для різних погодних умов, підвищуючи загальну ефективність системи.

РОЗДІЛ 4

Розробка та експериментальні дослідження системи керування автономними малопотужними фотоелектричними установками

4.1 Конструкція СФУ

Розроблена СФУ призначена для розміщення у віддалених місцях, там відсутня можливість отримати живлення від мережі, та є самодостатньою. Призначена для живлення приладів освітлення, світлофорів, приладів фіксації, метеорологічного обладнання та інших приладів. Зовнішній вигляд створеного макета СФУ, який розміщено на даху 7 корпусу НТУ "Дніпровська політехніка", показано на рисунку 4.1.

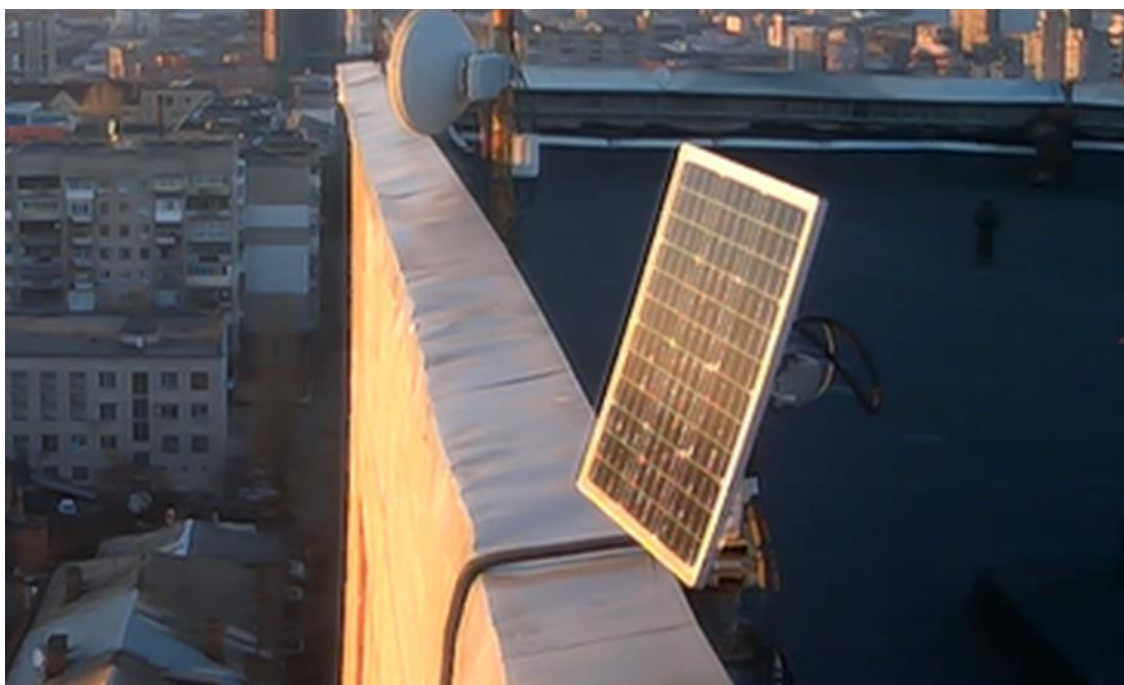


Рис. 4.1 Зовнішній вигляд створеного макета СФУ

Механічна система СФУ виконана на мотопідвісах DiSEqC-1.2. Таке рішення є інженерною адаптацією масового супутникового обладнання до задач автоматизованого просторового орієнтування СФП. Мотопідвіси DiSEqC-1.2 розроблені для точного та довготривалого позиціонування офсетних антен у супутникових телекомунікаційних системах, що зумовило наявність у них ряду конструктивних особливостей, надзвичайно корисних для застосування в системах сонячного стеження. До таких особливостей належать: самогальмівна

передача, достатньо високий крутний момент при малій швидкості обертання, інтегровані датчики положення, а також жорстка механічна конструкція, розрахована на роботу в умовах відкритого простору. Для позиціювання СФП у просторі використано два трекеру DiSEqC-1.2. Таке рішення забезпечує незалежне керування кутом нахилу СФП відносно горизонту та поворотом у горизонтальній площині за азимутом. Основою конструкції є несуча рама, виконана зі сталевого профілю, яка слугує жорстким базисом для кріплення мотопідвісів і одночасно виконує функцію передачі механічних навантажень на опорну конструкцію. Вимоги до цієї рами визначаються не лише масою СФП, але й аеродинамічними навантаженнями, що виникають під дією вітру, а також динамічними зусиллями, зумовленими прискореннями під час руху. Мотопідвіс DiSEqC 1.2 у типовому виконанні складається з електродвигуна постійного струму, черв'ячного редуктора з великим передаточним числом та вихідного вала, який обертається з малою кутовою швидкістю, але здатний розвивати значний момент. Конструкція мотопідвісу зображена на рисунку 4.2.

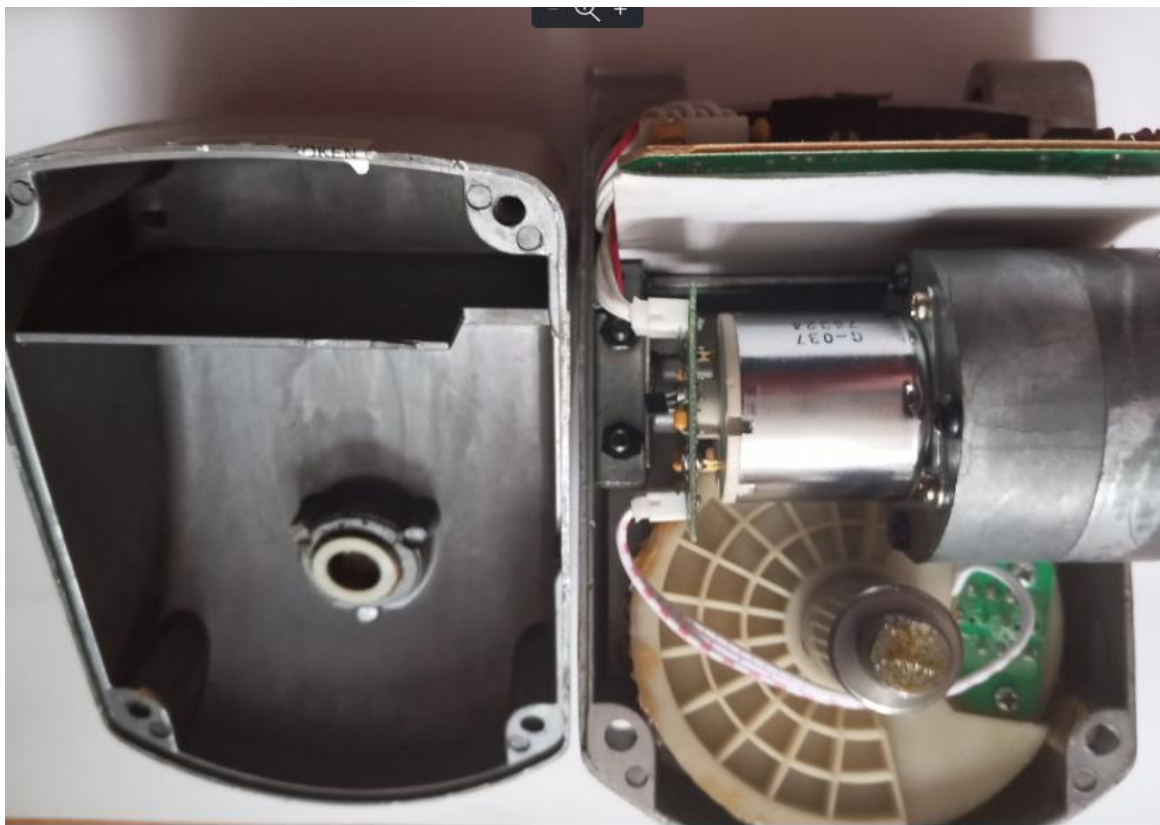


Рис. 4.2 Конструкція мотопідвіса

Черв'ячна передача забезпечує ефект самогальмування, при якому зовнішні навантаження, прикладені до вихідного вала, не можуть спричинити його зворотне обертання. Це означає, що після досягнення заданого кута положення СФП система не потребує постійного живлення для утримання позиції, а механічна стабільність забезпечується виключно властивостями редуктора. У конструкції азимутальної осі, яка відповідає за поворот СФП навколо вертикальної осі, мотопідвіс встановлений в нижній частині трекеру між нерухомою опорою та поворотною платформою. Вихідний вал мотопідвісу з'єднується з поворотною частиною рами, на якій розміщений мотопідвіс нахилу. Конструкція механічної частини СФУ зображена на рисунку 4.3. Таке компонування дозволяє розподілити навантаження таким чином, щоб основна маса СФП створювала переважно осьове навантаження на азимутальний вузол, що є найбільш сприятливим режимом для підшипників і черв'ячної пари. Така конструкція може працювати з СФП потужністю до 100Вт. Якщо таку конструкцію посилити опорними підшипниками та застосувати мотопідвіси з металевими шестернями, то потужність СФП можна збільшити до 550Вт.

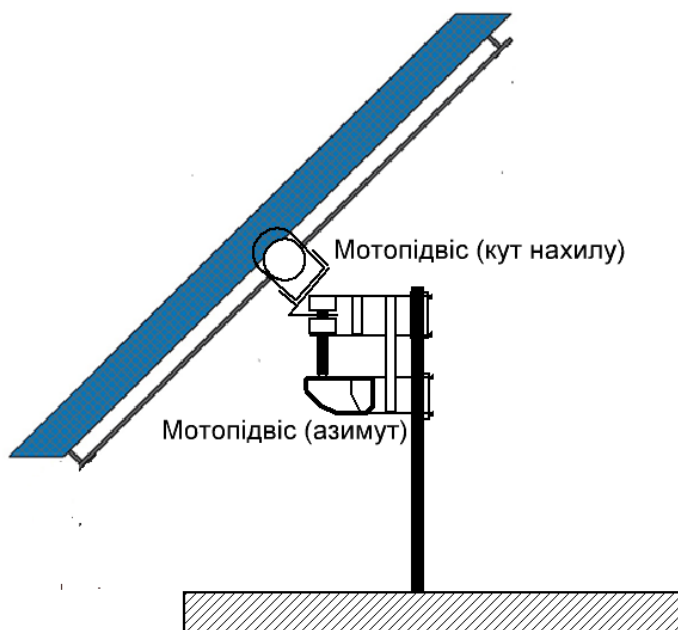


Рис. 4.3 Конструкція механічної частини СФУ

Крутний момент елеваційної вісі, необхідний для зміни кута нахилу, істотно залежить від положення центру мас СФП відносно осі обертання. З цієї причини вісь нахилу розташовується максимально близько до центру мас СФП, що зменшує статичний момент і відповідно навантаження на редуктор і двигун. Важливою складовою механічної системи є вузли підшипникової опори, які приймають радіальні та осьові навантаження під час експлуатації. У мотопідвісах DiSEqC-1.2 підшипники зазвичай інтегровані в корпус і розраховані на багаторічну роботу в умовах змінної температури та вологості.

Механічна система трекеру DiSEqC-1.2 розрахована на малу швидкість руху, що повністю відповідає задачі стеження за Сонцем. Час на поворот на 90° при напрузі живлення мотопідвісу 18В складає 30 секунд, що дозволяє реалізувати плавне та безінерційне переміщення СФП. Низька швидкість у поєднанні з великим передаточним числом редуктора призводить до того, що динамічні навантаження в механічній системі є незначними, а основними чинниками розрахунку стають статичні зусилля та вітрове навантаження. Аеродинамічне навантаження є одним з основних факторів при проектуванні механічної частини трекеру. На СФП у вертикальному положенні діє сила вітру, що створює значний згинальний і крутний момент. Трекер DiSEqC-1.2 за даними технічної документації витримує вітрові навантаження до 500кг.

Черв'ячні редуктори мають люфт при зміні напрямку обертання. У супутникових системах це компенсується алгоритмами керування, але для сонячних трекерів люфт не є критичним, оскільки рух відбувається в одному напрямку протягом світлового дня. При екстремальному пошуку цей фактор необхідно враховувати, оскільки він може вносити систематичну похибку в орієнтацію СФП.

Мотопідвіси DiSEqC-1.2 мають герметичний корпус, що забезпечує стабільну роботу механізму. Завдяки самогальмівним властивостям черв'ячного редуктора, високій механічній жорсткості та здатності працювати в умовах відкритого середовища, такі системи є особливо привабливими для експериментальних СФУ, автономних енергетичних комплексів і дослідницьких

стендів, де простота, відтворюваність і ремонтпридатність мають не менше значення, ніж ефективність і вартість.

4.2 Апаратна структура системи керування СФУ

Розроблена СФУ побудована на основі мікроконтролерної системи і призначена для перетворення сонячної енергії в електричну з одночасною просторовою орієнтацією СФП відносно положення Сонця та контролем електричних і теплових режимів роботи. Структурна схема системи зображена на рисунку 4.4.

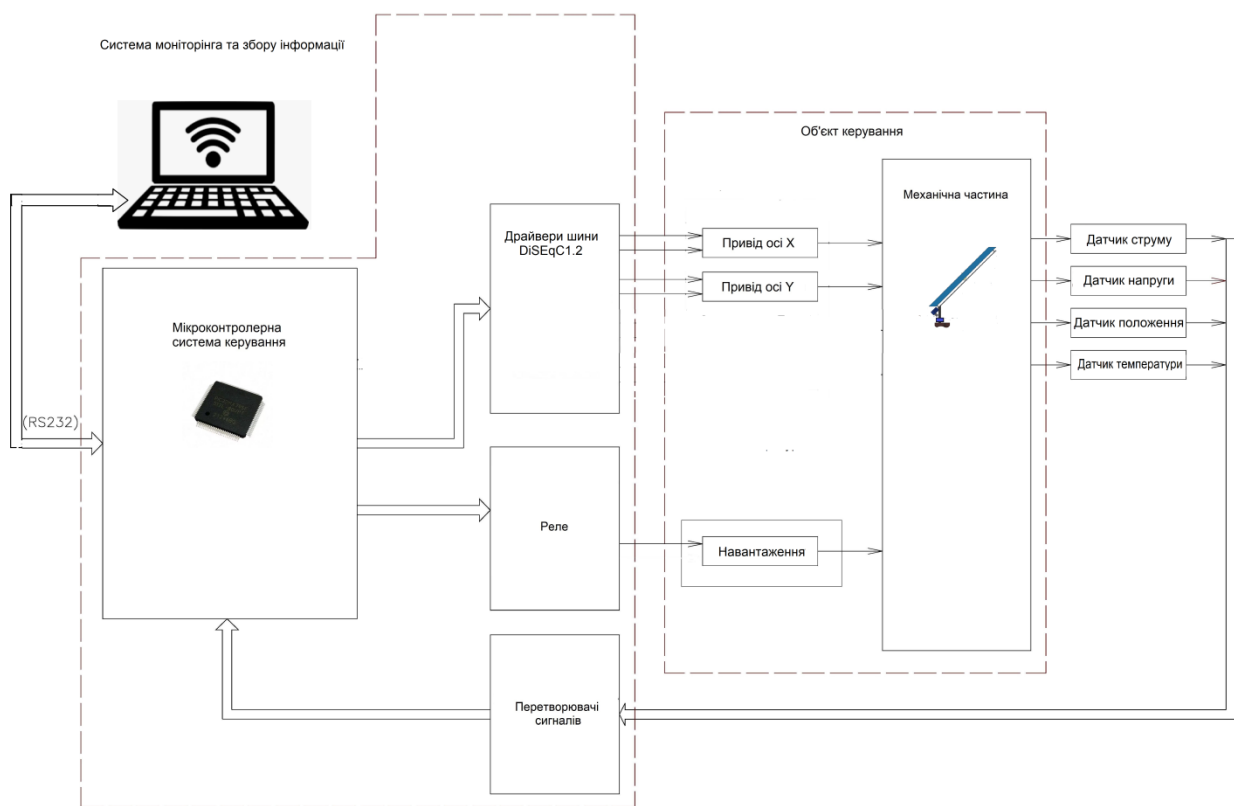


Рис. 4.4 Структурна схема системи

Система керування положенням СФП побудована на мікроконтролері PIC32MX795F512L виробництва Microchip Technology [75]. Цей мікроконтролер належить до високопродуктивної 32-бітної серії PIC32MX з частотою тактування 80 МГц, що забезпечує необхідну швидкість виконання команд для обробки даних від датчиків у реальному часі та генерації сигналів керування. Цей мікроконтролер (МК) може працювати в широкому температурному діапазоні від

–40°С до 85°С та має апаратний 10-розрядний багатоканальний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що дозволяє реалізувати вимір напруги, струму та температури за допомогою одного модуля. Значення напруги та струму використовується не лише для оцінювання енергетичних характеристик установки, але й для контролю допустимих режимів роботи, виявлення аварійних ситуацій та прийняття рішень щодо підключення або відключення навантаження. Контроль положення СФП у просторі реалізовано на базі інерціального 9-осьового датчика орієнтації GY-BNO055 від Bosch Sensortec, який інтегрує триосьовий акселерометр, гіроскоп та магнітометр з вбудованою обробкою даних, що дозволяє безпосередньо отримувати значення кутів орієнтації у вигляді Ейлерових кутів або кватерніонів. Зв'язок датчика з МК реалізовано за допомогою інтерфейсу UART, що забезпечує високу завадостійкість обміну даними. Датчик дозволяє вимірювати прискорення до $\pm 16g$ та кутову швидкість обертання до $\pm 2000\%/c$. Частота вимірювань акселерометра може сягати 1000 за 1 секунду. Температурний діапазон датчика - від –40°С до 85°С. Електромеханічна частина СФУ побудована на основі мотопідвісів стандарту DiSEqC 1.2, яка забезпечує поворот СФП у двох взаємно перпендикулярних площинах. Система керування положенням СФУ має додаткові виходи для підключення звичайних мотопідвісів на випадок потреби встановити мотопідвіс іншого типу. Важливим елементом системи є датчик температури, розташований у зоні фотоелектричного модуля для контролю теплового стану. Як датчик температури застосовано NTC термістор типу MF52A103F3950 з опором 10 КОм та коефіцієнтом $B=3950$. Для керування навантаженням застосований релейний модуль комутації навантаження, який дозволяє апаратно розривати електричний ланцюг між СФП та навантаженням.

Застосування готових мотопідвісів, які мають свою систему керування положенням, та інерційного вимірювального модуля положення в просторі GY-BNO055, який має вбудований процесор з готовими алгоритмами обчислення абсолютної орієнтації, дозволяє уникнути розробки власних систем та зменшити

час на створення експериментального зразка. Для обміну даними та моніторингу роботи реалізовано комунікацію з персональним комп'ютером через COM-порт [76]. Це дозволяє передавати дані вимірювань, результати обчислень та діагностичну інформацію, а також здійснювати налаштування параметрів системи в режимі реального часу. Використання UART забезпечує надійність і простоту з'єднання, а сумісність із сучасними ПК реалізується через USB-UART перетворювачі, як провідні, так і безпроводні, на основі бездротового радіомодуля LoRa E32 433T20D на базі чіпу SX1278, який працює на дозволений частоті 433МГц з радіозв'язком дальністю до 10км. Завдяки такому набору компонентів пристрій має високу точність, автономність, що робить його придатним як для наукових досліджень, так і для практичного застосування у сфері сонячної енергетики.

4.3 Механічна система позиціонування СФП у просторі

Для переміщення СФП у просторі використовується мотопідвіс DiSEqC 1.2. Зовнішній вигляд пристрою зображено на рисунку 4.5. Мотопідвіс працює за протоколом DiSEqC 1.2 [77]. Живлення та передача команд керування електромеханічним приводом відбувається по одному коаксіальному кабелю.



Рис. 4.5 Зовнішній вигляд мотопідвісу DiSEqC 1.2

Керуючий сигнал передається у вигляді цифрових команд, модульованих на тональну частоту 22 кГц, що накладається на постійну напругу живлення. Такий принцип робить систему компактною та енергетично ефективною. У протоколі DiSEqC 1.2. не забезпечено зворотній зв'язок. Мотопідвіс виконує отримані команди переміщення без зворотного зв'язку. Така архітектура відповідає класу розімкнених систем позиційного керування, де виконання команд можна відстежити за значенням споживаної потужності чи за сторонніми датчиками положення в просторі, як у даній роботі. У системах сонячного трекінгу це обмеження не є критичним, оскільки орієнтація СФП, як правило, змінюється повільно, а вимоги до миттєвої точності значно нижчі, ніж у високодинамічних сервоприводах. Для реалізації задач режимного керування, де положення СФП переводиться між фіксованими положеннями, мотопідвіс DiSEqC 1.2 дає можливість збереження кількох десятків позицій у внутрішній енергонезалежній пам'яті та перехід між цими точками за командою. Ці позиції можуть відповідати положенням СФП протягом дня або окремим режимам роботи системи. Наприклад, одна позиція може відповідати оптимальному нахилу за умов ясного неба чи граду та інша горизонтальному положенню за умов хмарності або сильного вітру. Перехід між такими положеннями виконується за допомогою команд переходу, що робить керування простим і надійним. Мотопідвіс виконує обмежену кількість переміщень, що зменшує механічний знос та енергетичні витрати на живлення приводу.

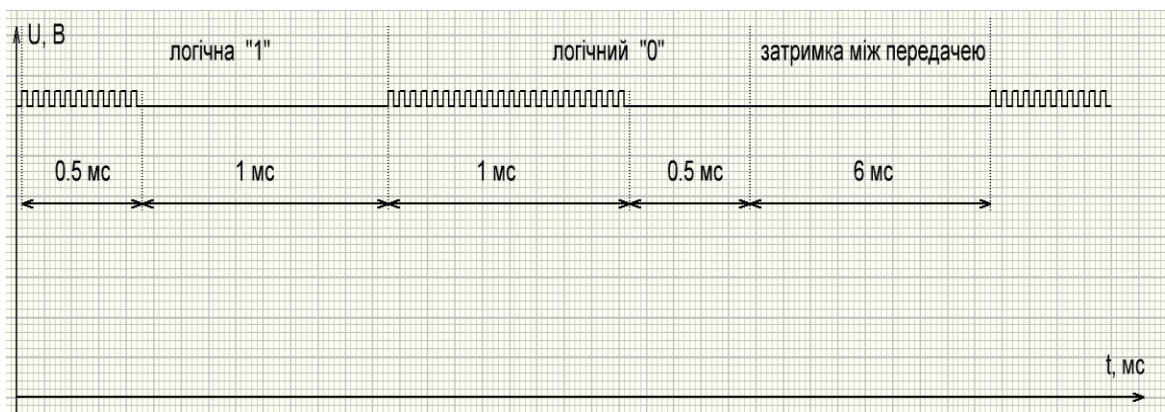


Рис. 4.6 Осцилограма сигналу DiSEqC 1.2.

Формування керуючого сигналу в протоколі DiSEqC 1.2 здійснюється шляхом накладання низькоамплітудного тонального сигналу на постійну напругу живлення, яка подається по коаксіальному кабелю до мотопідвісу. Осцилограма сигналу приведена на рисунку 4.6.

Напруга живлення мотопідвісу за стандартом становить 18 В постійного струму. Керуючий сигнал DiSEqC додається до напруги живлення у вигляді змінної складової. Амплітуда керуючого сигналу становить 1 В. Напруга під час передачі сигналу змінюється від 18 В до 19 В. У паузах між імпульсами передається лише постійна складова без тонального сигналу. Такий спосіб формування забезпечує електричну сумісність керування з живленням і не порушує роботи виконавчого механізму. Інформаційна модуляція здійснюється за допомогою тонального сигналу частотою 22 кГц. Електрична схема, яка формує сигнал керування, зображена на рисунку 4.7.

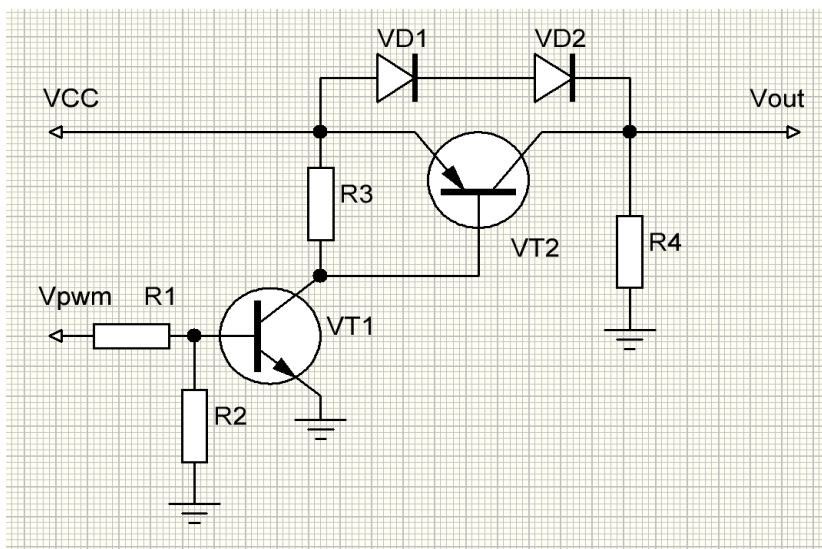


Рис. 4.7 Електрична схема, яка формує сигнал керування

Принцип роботи схеми полягає в шунтуванні послідовно з'єднаних діодів VD1 та VD2 типу 1N4007 транзистором VT2. При напрузі на вході 20В на діодах падає сумарно 1.408В, а на транзисторі VT2 типу КТ819А у відкритому стані на переході емітер-колектор падає 0.502В, різниця цих напруг складає 0.906В, що якраз вкладається у проміжок від 0.6В до 1В за стандартом DiSEqC 1.2. При

тестуванні сигнал передавався без помилок по коаксіальному дроту типа RG6 на відстань 90 метрів.

Електрична схема, яка вимикає мотопідвіс для економії енергії та для стабілізації вхідної напруги, зображена на рисунку 4.8.

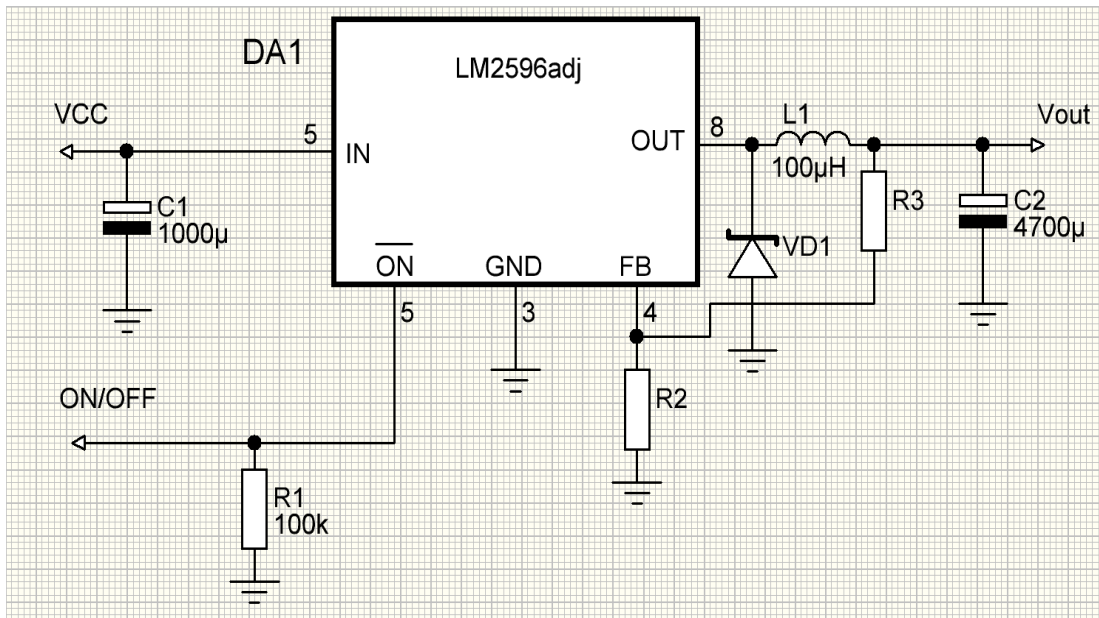


Рис. 4.8 Схема вимкнення живлення мотопідвіса

Схема реалізована за стандартною схемою з документації для мікросхеми LM2596adj, яка є імпульсним понижувальним стабілізатором напруги.

Параметри дільника на резисторах R2 та R3 розраховуються за формулою 4.1 для заданої напруги $V_{OUT} = 20V$ і складають при $R3 = 1.2k\Omega$ номінал резистора $R2 = 18.3k\Omega$.

$$V_{OUT} = 1.23 * \left(1 + \frac{R2}{R3}\right) \quad (4.1)$$

Вихід мікросхеми активується подачею логічного нуля на вхід ON/OFF. Реальна вихідна напруга визначається не лише дільником на резисторах, але й допусками опорної напруги конкретної мікросхеми. Тому при серійному виробництві замість резистору R2 доцільніше використовувати змінний резистор, що дозволить здійснювати калібрування значення вихідної напруги під конкретний екземпляр.

Кожен біт даних передається у фіксованому часовому інтервалі тривалістю 1,5 мс, але логічне значення визначається співвідношенням тривалості активної та

пасивної частини сигналу. Для логічного нуля частотно-модульований сигнал передається 1,0мс, після чого слідує пауза тривалістю 0,5мс. Для логічної одиниці частотно-модульований сигнал передається 0,5 мс, а пауза триває 1,0 мс. Завдяки цьому декодування виконується не за рівнем напруги, а за часовими параметрами сигналу. Передавання кожного байта здійснюється від молодшого біта до старшого, тобто молодший біт передається першим, що є принципово важливим для коректного декодування на стороні мотопідвісу. Структура байта включає вісім інформаційних бітів, після яких передається біт парності. Початок нового байта або фрейму визначається паузою без тонального сигналу тривалістю не менше 6 мс, яка виконує функцію синхронізації та відокремлення повідомлень. Контроль наявності помилок відбувається за допомогою коду перевірки на парність. Якщо в інформаційному байті вже міститься непарна кількість одиниць, біт парності встановлюється в нуль. Якщо ж кількість одиниць парна, біт парності встановлюється в одиницю. Такий підхід дозволяє приймальній стороні виявляти одиничні помилки під час передачі байта без значного ускладнення апаратної реалізації. Приклад виявлення помилок приведено на рисунку 4.9.

Команда	Лінія передачі даних									Прийнята команда
11	0	0	0	1	0	0	0	1	0	11
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	1	0	0	1	1	1	13
14	0	0	0	1	0	1	0	0	0	14
15	0	0	0	1	0	1	0	1	1	15
16	0	0	0	1	0	1	1	0	1	16
17	0	0	0	1	0	1	1	1	0	17
18	0	0	0	1	1	0	0	0	0	18
	Байт+біт парності									

Рис. 4.9 Приклад виявлення помилок

Після формування байта, з урахуванням порядку бітів і біта парності, послідовність передається у вигляді серії імпульсів, накладених на постійну напругу живлення. Мотопідвіс виділяє змінну складову за допомогою фільтра, аналізує часову структуру імпульсів, відновлює бітову послідовність, перевіряє парність кожного байта та, у разі коректного прийому, інтерпретує команду відповідно до її коду. Таким чином, формування керуючого сигналу DiSEqC 1.2 є регламентованим процесом, у якому поєднуються додавання змінної складової до постійної напруги живлення, часове кодування логічних станів, передавання бітів у порядку від молодшого до старшого та контроль на наявність помилок.

Керування мотопідвісом реалізується передачею цифрових команд, кожна з яких має фіксовану байтову структуру та відповідає конкретній дії виконавчого механізму. Усі команди формуються у вигляді послідовності байтів, які передаються від керуючого пристрою до мотопідвісу по коаксіальному кабелю. Хвильовий опір кабеля для безпомилкової передачі команд повинен бути 75 Ом. При проведенні дослідження опір коаксіального кабеля перевірявся за методикою, описаною у статті [78].

Стандартна структура повідомлення включає байт кадру, байт адресації, байт команди та кілька байтів даних. Для керування мотопідвісами в DiSEqC 1.2 типовим є використання байта кадру зі значенням E0h, який означає передачу команди від головного пристрою. Адресний байт для позиціонерів має значення 31h, що ідентифікує виконавчий механізм орієнтації. Таким чином, адресна частина мотопідвісу має вигляд E031h.

Команда зупинки руху, яка використовується для припинення обертання двигуна, активується командою з трьох байт E03160h. Для зняття програмних обмежень руху використовується команда вимкнення лімітів, що передається у вигляді E03163h, після чого мотопідвіс може переміщуватися по всьому доступному механічному діапазону. Для завдання допустимих меж переміщення використовуються команди встановлення східного та західного обмежень. Встановлення східної межі здійснюється командою E03166h, а західна межа задається командою E03167h. Після їх виконання мотопідвіс програмно обмежує

подальший рух відповідно до заданих крайніх положень, що має важливе значення для захисту механіки системи орієнтації СФП. Команди безперервного руху використовуються для прямого керування обертанням мотора в заданому напрямку.

Запуск руху в східному напрямку ініціюється командою E03168h, а рух у західному напрямку командою E03169h. За потреби до цих команд може додаватися байт даних, який задає часовий інтервал або кількість кроків переміщення. Однак, у багатьох реалізаціях використовується нульове значення параметра, що означає рух до отримання окремої команди зупинки. Позиційне керування реалізується за допомогою команд збереження та виклику кутових положень. Для запису поточного механічного положення у внутрішню пам'ять мотопідвісу використовується команда E0316Axxh, де байт xx визначає номер позиції. Як правило, допускається збереження декількох десятків позицій. Перехід до раніше збереженого положення здійснюється командою E0316Vxxh, у якій параметр xx відповідає номеру записаної позиції. Для команд переміщення E03168xxh, E03169xxh, якщо значення xx знаходиться в проміжку від 00h до 7Fh - це затримка в секундах, а якщо в проміжку від 80h до FFh - це кількість кроків, яку можна розрахувати за формулою $S = FFh - xxh$.

4.4 Програмний застосунок для моніторингу параметрів СФУ

Для опрацювання параметрів СФУ було розроблено та написано програмний застосунок, який реалізує повний цикл збору, обробки, аналізу та візуалізації експериментальних і модельних даних у реальному та квазістаціонарному режимах. Архітектура застосунку побудована за модульним принципом і включає підсистеми введення первинних даних, математичної обробки, формування керуючих впливів та представлення результатів користувачу. Програма системи моніторингу розроблена на мові програмування C# [79] з графічний інтерфейсом, зовнішній вигляд якої приведено на рисунку 4.10.

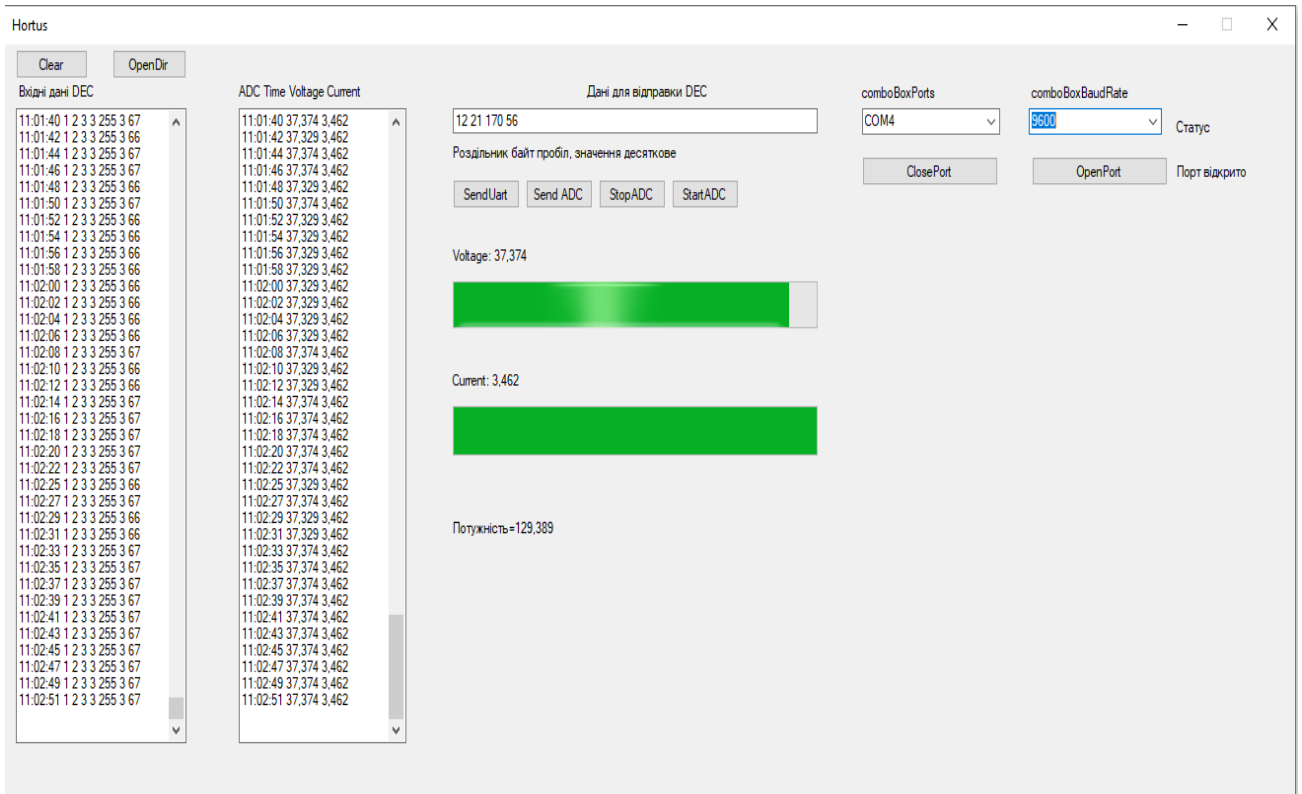


Рис. 4.10 Програма системи моніторингу

Програма дозволяє отримати данні з датчиків струму, напруги та температури. Всі значення зберігаються в окремий файл з часом та датою виміру. Кожен день створюється окремий файл. Запис ведеться лише в світловий період доби. Отримані дані проходять попередню фільтрацію та нормалізацію з метою зменшення впливу шумів і похибок вимірювання. Ці дані потрібні для відладки алгоритмів керування та для використання в математичній моделі СФУ як емуляція впливу атмосфери на ефективність роботи СФП, зокрема, електричної моделі та моделей надходження сонячного випромінювання, що дозволяє оцінювати миттєві та інтегральні енергетичні показники системи. На основі результатів розрахунків формується інформаційна база для алгоритмів керування, які визначають оптимальні режими орієнтації СФП та зарядно-розрядні режими акумуляторної батареї (АКБ) з урахуванням поточного енергетичного балансу.

4.4.1 Методика вимірювання температури СФП

У розробленій системі вимірювання температури здійснюється датчиком температури на базі терморезистора MF52A103F3950 з номінальним опором 10

кОм при температурі 25°C з температурним коефіцієнтом $B = 3950$. Даний датчик належить до класу NTC-терморезисторів, для яких при зростанні температури зменшується опір. Це дозволяє реалізувати перетворення температури в електричний сигнал з подальшим аналого-цифровим перетворенням за допомогою модуля АЦП МК.

Виготовляють терморезистори з полікристалічних напівпровідників шляхом спікання оксидів перехідних металів, таких як марганець, нікель, кобальт, залізо або мідь, у різних співвідношеннях. Ці матеріали належать до класу напівпровідників з вузькою забороненою зоною та значною кількістю локалізованих енергетичних рівнів, зумовлених домішками, дефектами ґратки та міжзерновими границями. Зі зростанням температури зростає середня енергія теплового руху частинок. Це призводить до термічного збудження електронів, унаслідок чого частина з них переходить з локалізованих або валентних рівнів у зону провідності. Одночасно у валентній зоні утворюються дірки, які також є рухомими носіями заряду. Таким чином, підвищення температури викликає різке зростання концентрації електронів і дірок, здатних переносити електричний струм. Зростання концентрації носіїв заряду з температурою має експоненційну форму. Це означає, що навіть відносно невелике підвищення температури призводить до значного збільшення електропровідності матеріалу, внаслідок чого зменшується опір. Схема виміру температури зображена на рисунку 4.11.

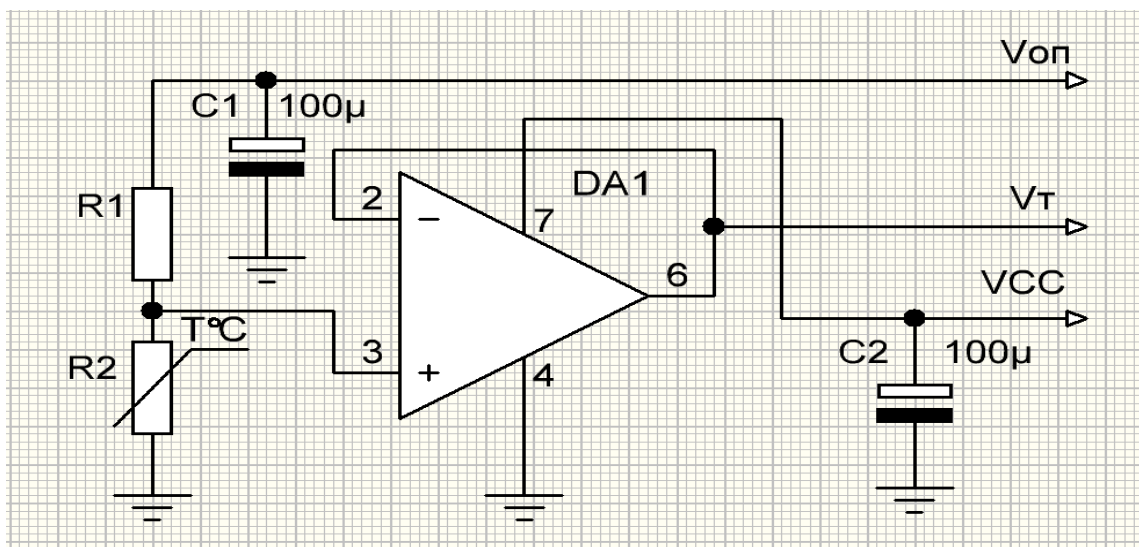


Рис. 4.11 Схема виміру температури

Резистивний дільник [80-82] на резисторах $R1$ та $R2$ формує напругу, залежну від опору терморезистора. У даній системі опорна напруга аналого-цифрового перетворювача становить $V_{оп} = 3V$ і використовується як джерело живлення дільника. Вихідна напруга дільника визначається за формулою 4.2.

$$V = V_{оп} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (4.2)$$

Вибір номіналу резистора $R1$ здійснюється з урахуванням забезпечення максимальної чутливості вимірювання в заданому температурному діапазоні. Максимальна зміна напруги на виході дільника при зміні опору терморезистора досягається у випадку, коли $R1$ дорівнює опору терморезистора в робочій точці. Оскільки для MF52A103F3950 опір при температурі $25^{\circ}C$ становить $R25 = 10k\Omega$, доцільно обирати $R1 = 10k\Omega$, якщо середня температура експлуатації системи наближена до кімнатної. Безпосереднє підключення дільника напруги до входу АЦП PIC32 є можливим, однак, з точки зору точності вимірювання та стабільності результатів доцільним є використання операційного підсилювача між дільником і входом АЦП. Основною причиною цього є змінний та відносно великий вихідний опір дільника, який визначається паралельним з'єднанням резисторів $R1$ та $R2$. Вхід АЦП містить внутрішній вибірковий конденсатор, що заряджається від джерела сигналу в момент дискретизації. За наявності значного вихідного опору джерела це призводить до похибки оцифрування. Використання операційного підсилювача в режимі повторювача напруги забезпечує низький вихідний опір вимірювального каналу, ізолює дільник від впливу внутрішніх схем АЦП. Після подачі сигналу на вхід АЦП виконується його перетворення в цифровий код. Для АЦП з розрядністю n біт значення напруги розраховується за формулою 4.3.

$$V = d * \frac{V_{оп}}{2^n - 1}, \quad (4.3)$$

де d - код АЦП після перетворення.

Отримавши значення напруги V , можна визначити опір терморезистора за формулою 4.4.

$$R2 = V * \frac{R1}{V_{оп} - V} \quad (4.4)$$

Перетворення опору терморезистора в температуру здійснюється з використанням експоненційної В-моделі, яка є стандартною для NTC-терморезисторів, та розраховується за формулою 4.5.

$$t = 273.15 - \frac{1}{\frac{1}{T25} + \frac{1}{B} * \ln\left(\frac{R2}{R25}\right)} \quad (4.5)$$

При опорній напрузі 3В і значеннях опорів порядку 10 кОм струм дільника становить 150 мкА, а потужність, що розсіюється на терморезисторі, є незначною і, як правило, не призводить до помітної похибки вимірювання температури.

4.4.2 Методика вимірювання напруги, яку виробляє СФП

За умови, що максимальна напруга, яку генерує СФП становить 40В, вимірювальний канал напруги повинен бути спроектований таким чином, щоб навіть у режимі холостого ходу, при низькій температурі та високій інсоляції, напруга на вході аналого-цифрового перетворювача не перевищувала допустиме значення опорної напруги 3В. Це є гарантією відсутності нелінійних спотворень і пробою вхідних ланцюгів мікроконтролера. Схема дільника та підсилювача на ОУ зображена на рисунку 4.12.

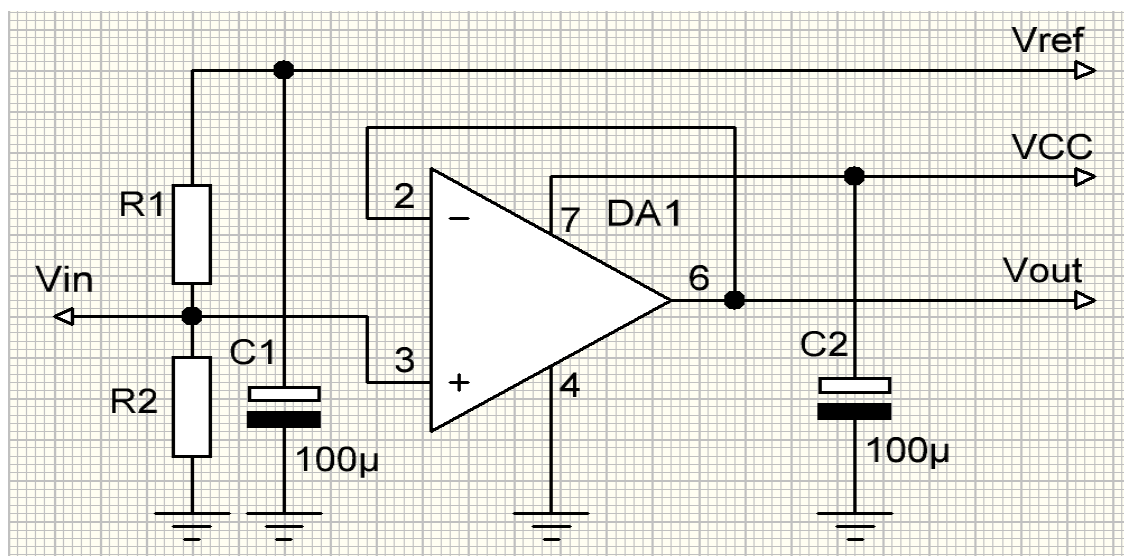


Рис. 4.12 Схема виміру напруги

Для масштабування напруги 0-40В до діапазону 0-3В використовується резистивний дільник напруги на резисторах R_1 та R_2 з коефіцієнтом ослаблення не менше ніж 13,33. Вихідна напруга дільника визначається за формулою 4.6.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.6)$$

Якщо вибрати $R_2=10\text{кОм}$, тоді $R_1 = R_2 * (\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1) = 10 * (\frac{40}{3} - 1) = 123\text{кОм}$. Струм через

дільник в цьому випадку буде $I_{дільника} = \frac{40}{133 * 10^3} = 3 * 10^{-4} \text{ А}$. Такий струм є достатньо

малим, щоб практично не навантажувати СФП і не впливати на його робочу точку, але водночас достатнім для зменшення впливу шумів і струмів витоку входу операційного підсилювача (ОП). Еквівалентний вихідний опір дільника

становить $R_{виход.} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1230}{133} = 9.25\text{кОм}$. Для АЦП мікроконтролерів сімейства

РС32 таке значення вихідного опору є гранично допустимим, оскільки внутрішній вибірковий конденсатор потребує швидкого заряджання протягом часу вибірки. Саме з цієї причини між дільником напруги та входом АЦП вводиться операційний підсилювач, увімкнений у режимі повторювача напруги. Операційний підсилювач у цій конфігурації забезпечує практично достатній вхідний опір для резистивного дільника та дуже малий вихідний опір для входу АЦП. Це повністю усуває вплив динаміки заряджання вибіркового конденсатора на результат вимірювання.

Після масштабування та буферизації напруга подається на вхід АЦП з опорною напругою 3 В. Маючи значення коду АЦП D та розрядність АЦП n , можна обчислити значення напруги за формулою 4.7.

$$V = V_{опорне} * \frac{D}{2^n - 1} * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.7)$$

Методика вимірювання напруги, яку генерує СФП, являє собою послідовний процес масштабування напруги резистивним дільником, буферизації сигналу операційним підсилювачем, аналого-цифрового перетворення та програмного відновлення реального значення напруги. Такий підхід забезпечує

лінійність, відтворюваність і достатню точність вимірювання, необхідну для реалізації алгоритмів керування та моніторингу параметрів сонячних енергетичних систем.

4.4.3 Методика вимірювання струму, який споживає навантаження

Вимірювання струму, який виробляє СФП є необхідною складовою, оскільки саме струм разом з напругою визначає миттєву потужність СФП і дозволяє реалізувати та дослідити алгоритми керування, зокрема методи відстеження положення СФП у просторі для максимальної генерації енергії. На відміну від вимірювання напруги, струм не може бути безпосередньо поданий на вхід АЦП і потребує попереднього перетворення в пропорційну напругу. Фізично струм СФП є результатом руху носіїв заряду, згенерованих у напівпровідниковій структурі фотоелемента під дією сонячного випромінювання. У зовнішньому колі цей струм протікає від позитивного виводу СФП до навантаження і далі до негативного виводу. Для його вимірювання необхідно ввести в коло елемент, на якому спадатиме напруга, пропорційна струму, але який при цьому мінімально впливатиме на режим роботи СФП. Найбільш розповсюдженим методом є вимірювання струму за допомогою шунтового резистора. Шунт являє собою резистор з малим, точно відомим опором, який вмикається послідовно з навантаженням СФП. Метод точного вимірювання опору шунтового резистора описано в статті [83]. Схема вимірювання струму зображена на рисунку 4.13.

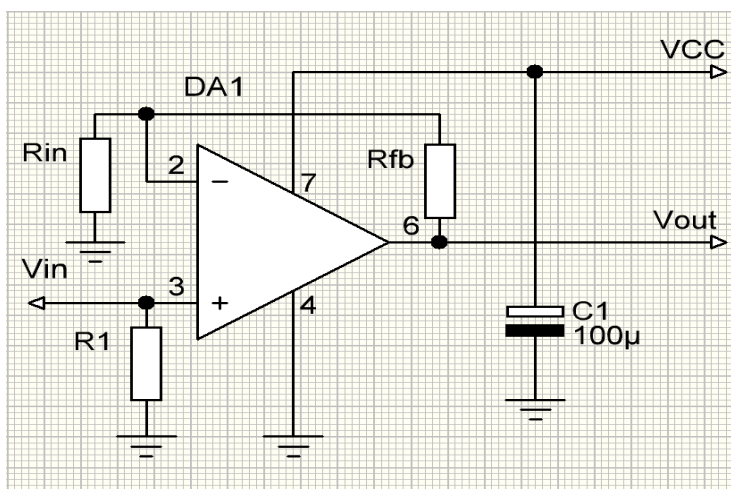


Рис. 4.13 Схема виміру струму

При протіканні струму на шунті виникає падіння напруги, яке відповідно до закону Ома визначається за формулою 4.8.

$$U_{шунта} = I * R_{шунта} \quad (4.8)$$

Вибір номіналу шунтового резистора є компромісом між двома суперечливими вимогами. З одного боку, напруга на шунті повинна бути достатньо великою для надійного вимірювання з урахуванням розрядності та шумів АЦП. З іншого боку, падіння напруги на шунті не повинно істотно зменшувати напругу, доступну навантаженню, і не повинно призводити до додаткових втрат потужності. Тому опір шунта зазвичай вибирають у діапазоні від кількох міліомів до часток ома, залежно від максимального струму СФП. Нехай максимальний струм СФП дорівнює 10А. Тоді максимальна напруга на шунті становитиме $U_{шунта} = 10 * 0.1 = 1В$. Ця напруга є суттєво меншою за опорну напругу АЦП. Безпосереднє подання такого сигналу на АЦП призводить до неефективного використання його динамічного діапазону та зниження роздільної здатності вимірювання струму. Саме з цієї причини після шунта використовується підсилювальний каскад на операційному підсилювачі. Операційний підсилювач у каналі вимірювання струму підсилює малу напругу на шунті до рівня, співмірного з опорною напругою АЦП, чим забезпечує ефективне використання всієї розрядності перетворювача та забезпечує високий вхідний опір і практично не впливає на струм у вимірюваному колі. Операційний підсилювач вмикається за схемою неінвертувального підсилювача. Коефіцієнт підсилення такого каскаду визначається співвідношенням резисторів зворотного зв'язку. Його можна розрахувати за формулою 4.9.

$$k = 1 + \frac{R_{fb}}{R_{in}} \quad (4.9)$$

Коефіцієнт підсилення вибирається таким чином, щоб при максимальному струмі СФП напруга на виході підсилювача не перевищувала опорну напругу АЦП, яка в даній системі дорівнює 3 В. При $k = 3$ напруга на виході ОУ буде рівною 3В, при цьому значення резистора $R_{fb} = 200 кОм$, а $R_{in} = 100 кОм$.

Після підсилення сигнал подається на вхід АЦП мікроконтролера, який перетворює миттєве значення напруги в цифровий код, пропорційний відношенню цієї напруги до опорної. Отримане цифрове значення є безрозмірною величиною, яка потребує програмної обробки для відновлення фізичного значення струму. Цифровий код АЦП перетворюється в напругу на його вході з урахуванням розрядності та опорної напруги, а потім з цієї напруги обчислюється струм шляхом зворотного масштабування з урахуванням коефіцієнта підсилення та опору шунта. Розрахувати струм можна за формулою 4.10.

$$I = \frac{d * U_{ref}}{k * R_{sh} * (2^n - 1)} \quad (4.10)$$

Таким чином, канал вимірювання струму СФП є лінійною системою, параметри якої повністю визначаються номіналами пасивних елементів та характеристиками операційного підсилювача і АЦП. Коректний вибір цих параметрів забезпечує передбачувану похибку та можливість подальшої аналітичної обробки результатів вимірювання в задачах керування положенням СФП у просторі.

4.4.4 Розрахунок похибок вимірювання напруги і струму

Вимірювання електричних параметрів СФП відбувається за допомогою АЦП МК. Точність вимірювань визначається параметрами АЦП і вузлами перетворення сигналу [84,85]. У даному розділі розглянуто оцінку теоретичних похибок вимірювання напруги та струму за умови використання 10-бітного АЦП з опорною напругою 3В. Максимальна напруга, яку виробляє СФУ становить 40 В, що перевищує допустимий вхідний діапазон АЦП МК. Для узгодження рівнів напруги використовується резистивний дільник, який перетворює вимірювану напругу до діапазону від 0 до 3 В. Коефіцієнт ділення такого дільника визначається як відношення опорної напруги АЦП до максимальної вимірюваної напруги та дорівнює $k = \frac{U_{ref}}{U_{max}} = \frac{3}{40} = 0.075$ В. Напруга на вході АЦП є пропорційною напрузі СФУ, а відновлення реального значення здійснюється шляхом множення оцифрованої напруги на цей коефіцієнт. 10-бітний АЦП має 1024 дискретні рівні

квантування. При опорній напрузі 3В ціна одного молодшого розряду становить

$$\Delta U_{ADC} = \frac{U_{ref}}{2^n} = \frac{3}{1024} = 0.00293 \text{ В.}$$

Це значення визначає мінімальну зміну напруги на вході АЦП, яка може бути зафіксована цифровою системою. Таким чином, роздільна здатність вимірювання напруги обмежується значенням

$$\Delta U_{IN} = \frac{\Delta U_{ADC}}{k} = \frac{0.00293}{0.075} = 0.039 \text{ В.}$$

Квантувальна похибка ідеального АЦП не перевищує половини молодшого розряду. Для даної системи максимальна абсолютна похибка на вході АЦП становить $\varepsilon_{ADC} = \frac{\Delta U_{ADC}}{2} = 1.47 \text{ мВ}$, що в перерахунку на напругу СФУ відповідає похибці близько $\varepsilon_{IN} = \frac{\varepsilon_{ADC}}{k} = 0.02 \text{ В}$.

Отримане значення є нижньою межею похибки вимірювання напруги, яка зумовлена виключно дискретністю АЦП та не враховує похибок резисторів дільника і нестабільності опорної напруги.

Вимірювання струму СФУ здійснюється за допомогою шунтового резистора з опором 0.1Ом, увімкненого послідовно з навантаженням. За максимального струму 10А падіння напруги на шунті становить 1В, що повністю вкладається в допустимий діапазон входної напруги АЦП. Для точності виміру діапазон збільшується за допомогою підсилювача на операційному підсилювачі (ОП) до 3В. Напруга на шунті є лінійно пропорційною струму, а визначення струму виконується шляхом ділення вимірюваної напруги на номінал шунтового опору. Дискретність вимірювання струму визначається ціною молодшого розряду АЦП та значенням шунта. За напруги квантування 2.93 мВ мінімальна фіксована зміна струму становить приблизно

$$\Delta I = \frac{U_{ref}}{(2^n - 1) * R_1 * k_{OY}} = 29 \text{ мА.}$$

Максимальна квантувальна похибка, яка відповідає половині молодшого розряду, у перерахунку на струм становить $\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{2} = 0.145 \text{ мА}$. Отримані значення похибок визначають теоретичну межу точності системи. У реальних умовах до них додаються похибки, зумовлені допусками шунтового резистора, температурною залежністю його опору, нестабільністю опорної напруги АЦП, а також наявністю

шумів і пульсацій у вимірювальних ланцюгах. Проте навіть з урахуванням цих факторів квантувальна похибка АЦП залишається основним обмеженням, яке неможливо зменшити без підвищення розрядності перетворювача або застосування аналогового підсилення вимірювальних сигналів. Таким чином, за використання 10-бітного АЦП з опорною напругою 3 В система вимірювання забезпечує достатню точність для моніторингу напруги та струму СФУ, що робить її придатною для задач аналізу режимів роботи та реалізації алгоритмів керування.

4.5 Синтез системи керування

Система керування положенням СФП у просторі розроблена з урахуванням динамічних змін освітленості протягом дня та фізичних властивостей СФП та привідних механізмів. Код програми керування на мові C++ для мікропроцесора PIC32MX795F512L приведено у додатку Б. Основною метою керування є максимізація виробленої потужності при мінімальних механічних витратах та забезпечення адаптивності до змін погодних умов.

Система побудована на мікроконтролері PIC32MX795F512L фірми MICROCHIP з тактовою частотою 80 МГц і використовує 10 бітний модуль АЦП для вимірювання напруги та струму датчика освітленості, виконаного на основі малопотужної СФП, яка зображена на рисунку 4.14.



Рис. 4.14 Розташування допоміжної СФП

Малопотужна СФП прикріплена до основної. Таке рішення потрібне для того, щоб забезпечити точне визначення локального максимуму інсоляції без впливу динамічно змінного навантаження основної СФП.

Використання малопотужної допоміжної СФП дозволяє отримувати чистий сигнал потужності, який відображає реальну освітленість і положення Сонця на небосхилі, незалежно від змін струму через основне навантаження. До допоміжної СФП для вимірювання напруги підключено дільник напруги з коефіцієнтом ділення $k_U = 10$, що дозволяє вимірювати напругу до 30В, та для вимірювання струму підключено шунтовий резистор опором $R_{\text{шунта}} = 0.10$ Ом з підсилювачем на ОП з коефіцієнтом підсилення $k_I = 10$, що дозволяє вимірювати струм до 3А, оскільки опорна напруга АЦП МК 3В.

Напруга розраховується $U_i = \frac{\text{kodADC}_{U_i} * U_{\text{опорне}} * k_U}{2^{10}}$, а струм як $I_i = \frac{\text{kodADU}_{I_i} * U_{\text{опорне}}}{2^{10} * R_{\text{шунта}} * k_I}$. Миттєва потужність СФП визначається як $P_i = U_i * I_i$, і

значення заносяться до масиву на $N = 450$ елементів, що відповідає 15 хвилинам накопичення даних при частоті вимірювань 2 секунди. Таке накопичення дозволяє отримати масив даних для статистичного дослідження. Час та частота вибірки була визначена емпірично на основі проведених досліджень.

Після накопичення масиву даних обчислюється середнє значення потужності $P_{\text{Середнє}} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N P_i$ та проводиться центрування вибірки $P_{S_i} = P_i - P_{\text{Середнє}}$. На основі

центрованих даних обчислюється стандартне відхилення $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_{S_i}^2}{N}}$. На основі

коефіцієнта варіації розраховується індекс хмарності $ClIndex = \frac{\sigma}{P_{\text{Середнє}}}$, Порогові

значення $ClIndex$ дозволяють класифікувати стан погоди. Якщо $P_{\text{Середнє}} < P_{\text{мін}}$ та $ClIndex \geq ClIndex_{\text{cloud}}$, система визначає стан “хмарно”, при $ClIndex < ClIndex_{\text{sun}}$, система

визначає стан “сонячно”, а якщо $CIIndex_{sun} \leq CIIndex < CIIndex_{cloud}$, то система визначає стан “змінна хмарність”.

Таке розділення дозволяє системі приймати рішення щодо режиму роботи, адаптуватися до короточасних змін освітленості та забезпечувати ефективне використання ресурсу моторів та економити накопичену енергію. У стані “хмарно” СФП приймає горизонтальне положення. Система керування дає команду мотопідвісу рухатись до спрацювання кінцевого датчика ліміту. В такому стані СФП залишається нерухомою до наступного циклу накопичення даних, що запобігає марному витрачання енергії на роботу двигунів. Цей режим виконує функцію збереження ресурсів механіки при мінімальній генерації електроенергії. При сонячній погоді або змінній хмарності запускається алгоритм екстремального пошуку. Алгоритм пошуку оптимального положення СФП у просторі визначає напрям пошуку $DIRA$ за кутом азимута a та напрям руху $DIRL$ за кутом нахилу СФП b . Потім встановлюється кут нахилу СФП $b = 30^\circ$, а потім за визначеним напрямком зміщується СФП за азимутом до досягнення максимального значення генерованої потужності. Далі відбувається пошук максимально генерованої потужності за віссю кута нахилу СФП.

Максимум вважається знайденим, коли значення потужності після досягнення максимуму почало зменшуватись. Цей підхід дозволяє точно визначити оптимальні кути азимуту та висоти, забезпечуючи максимальне вироблення електроенергії.

Коли система знайде точку з максимальною генерацією енергії зміна положення СФП продовжиться за часом. При екстремальному пошуці накопичення даних для статистичної обробки не відбувається, оскільки екстремальний пошук спотворить данні, за якими визначається критерій хмарності. В умовах змінної хмарності щільність хмар дозволяє провести локальний екстремальний пошук, проте, через коливання освітленості після визначення локального максимуму СФП переходить у режим руху тільки по азимуту, оскільки висота Сонця над горизонтом є менш критичною в умовах часткової хмарності. Кутова швидкість руху Сонця по небосхилу становить

$\omega_{sun} = \frac{0.25^\circ}{x6}$, тобто кожні 4 хвилини треба переміщати СФП на 4° . Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальне положення СФП без постійного екстремального пошуку, економить ресурси приводу та забезпечує безперервне стеження за сонячним диском у непостійних умовах освітленості. Робота системи керування передбачає накопичення нового масиву даних кожні 15 хвилин, повторне обчислення статистичних параметрів та визначення нового індексу хмарності i , відповідно, прийняття рішення про режим роботи. За умови повної хмарності СФП переводиться в горизонтальне положення, в умовах сонячної погоди відбувається екстремальний пошук, а в умовах змінної хмарності астрономічний пошук. Кожна ітерація формує значення кутів, які передаються драйверу моторів для фізичного переміщення СФП, забезпечуючи точне стеження за Сонцем. Для реалізації алгоритму на PIC32MX795F512L використовується модуль АЦП для вимірювання напруги та струму, таймери та переривання для циклічного накопичення даних, масив пам'яті для збереження масиву значень. Драйвера отримують цільові кути для переміщення СФП у просторі, а алгоритм формує тільки цільові кути та контролює логіку роботи.

4.6 Моделювання та експериментальні дослідження

Для дослідження алгоритму керування СФУ з двовісною системою орієнтації та для оцінки ефективності роботи розробленого алгоритму керування було написано застосунок мовою програмування C#, скріншот якого зображено на рисунку 4.15.

У реальних умовах експериментальна перевірка алгоритму керування потребує тривалого часу, значних матеріальних ресурсів та може супроводжуватися додатковим зношуванням обладнання.

Тому доцільним є використання програмної моделі, яка дозволяє імітувати роботу установки протягом будь-якого періоду часу без фізичного втручання в реальну систему. Застосунок проводить обробку експериментальних або штучно згенерованих кліматичних даних. На основі описаних моделей у 2 розділі розраховує генеровану потужність СФУ для різних кліматичних умов.

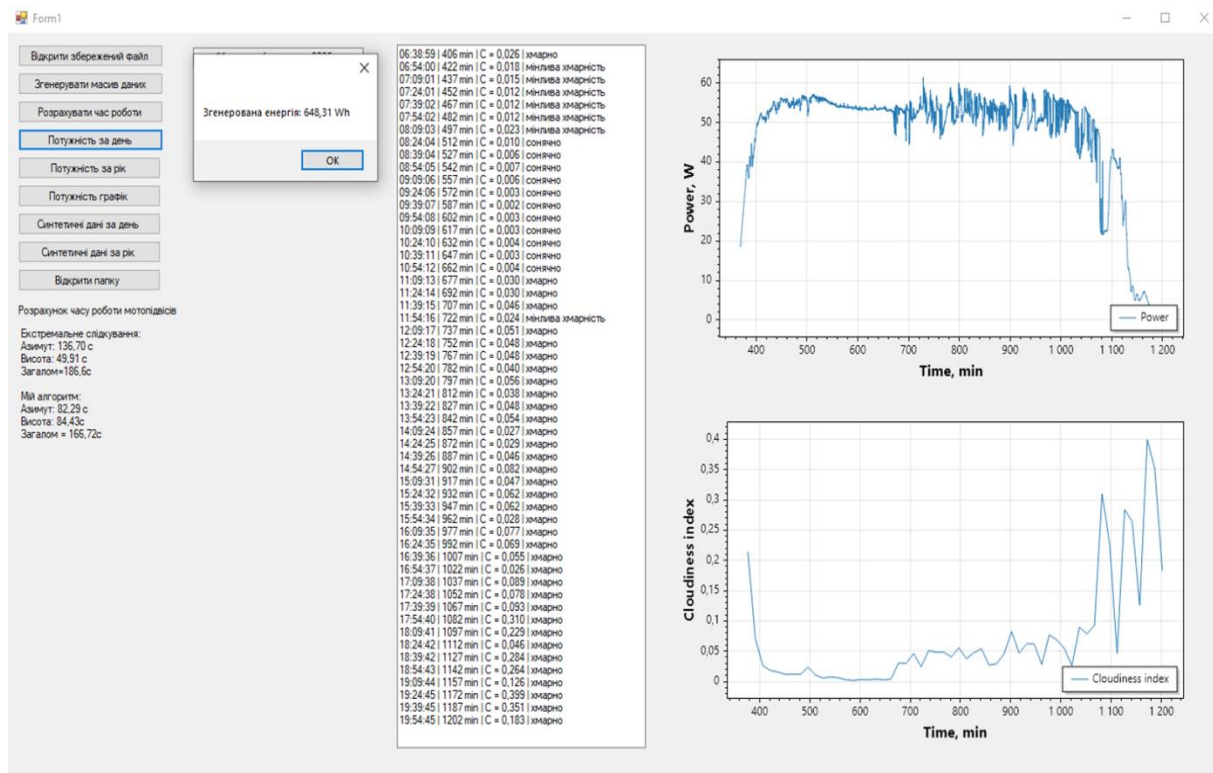


Рис. 4.15 Скріншот застосунку для тестування розробленого алгоритму керування положенням СФП у просторі

Крім того, застосунок дозволяє змінювати в кодї часову дискретизацію, порогові значення хмарності, швидкість моторів, характеристики СВП та інші параметри для оперативної оцінки впливу цих змін на технічні та економічні показники системи. Лістинг коду приведено у додатку В.

Програмний застосунок виконує функцію інструмента порівняльного аналізу. Він дозволяє кількісно зіставити класичний режим безперервного стеження за Сонцем із запропонованим алгоритмом, який враховує хмарність для розрахунку економічних показників.

Для генерації файла з синтетичними значеннями струму та напруги за добу треба вибрати дату та натиснути на кнопку “Згенерувати масив даних”. Файл буде згенеровано, якщо є інтернет-з’єднання. Файл збережеться у папці з програмою. Застосунок автоматично звертається до відкритого кліматичного сервісу NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources), який надає архівні метеорологічні та радіаційні параметри для будь-якої географічної точки. З

сервісу завантажуються погодинні значення хмарності (CLOUD_AMT) та показник сумарної сонячної радіації на горизонтальній поверхні (ALLSKY_SFC_SW_DWN) та зберігається у .csv файлі в папці з програмою. Наявність інтернет з'єднання є обов'язковим, оскільки отримання даних здійснюється через HTTP-запит до API-сервісу. Отримані кліматичні дані використовуються як базова інформація для моделювання реальних атмосферних умов у вибрану добу. Оскільки сервіс надає значення з часовим кроком одна година, ці дані не можуть бути безпосередньо використані для електричного моделювання, яке виконується з малим кроком дискретизації. Тому на наступному етапі здійснюється апроксимація погодинних значень. Апроксимація виконується методом лінійної інтерполяції між сусідніми погодинними точками. Якщо позначити хмарність у години t_i та t_{i+1} як C_i та C_{i+1} , то для будь-якого моменту часу t всередині цього інтервалу значення визначається за формулою 4.11.

$$C(t) = C_i + \frac{C_{i+1} - C_i}{t_{i+1} - t_i} * (t - t_i) \quad (4.11)$$

У результаті формується часовий ряд хмарності з заданим кроком, підлаштований під задану часову сітку. Такий підхід забезпечує поступову зміну атмосферних параметрів протягом доби та виключає стрибкоподібні переходи, які виникали б при прямому використанні погодинних даних. Далі для кожного моменту часу обчислюється положення Сонця та відповідна позаатмосферна іррадіація. Отримане значення коригується з урахуванням інтерпольованої хмарності за методикою, описаною в розділі 2. Зменшення іррадіації реалізується через коефіцієнт пропускання атмосфери, який функціонально залежить від індексу хмарності. Таким чином формується миттєва ефективна іррадіація, що надходить на площину СФП. Фотострум визначається пропорційно до отриманої іррадіації, після чого для розрахунку робочих значень струму та напруги в кожний момент часу використовується модель одного діода на основі рівняння Шоклі. У результаті формується детальний синтетичний часовий ряд електричних параметрів за добу. Для наближення моделі до реальних умов експлуатації у

сформовані сигнали вводиться шумова складова. Шум додається для імітації швидкоплинних змін освітленості, зумовлених рухом хмар. Погодинні дані сервісу NASA POWER відображають лише усереднений стан атмосфери протягом години і не враховують короточасні флуктуації сонячної радіації, які спостерігаються в реальних умовах. Оскільки фактичне проходження хмар через сонячний диск призводить до локальних та відносно швидких спадів і відновлень інтенсивності випромінювання, у модель вводиться стохастична складова. Шум $\varepsilon(t)$ моделює струм $I_{nois}(t) = I(t) + \varepsilon(t)$ як псевдовипадкова величина з нормальним розподілом, амплітуда якої розраховується з урахуванням щільності хмар.

Аналогічно формується шум для напруги. Введення шуму дозволяє врахувати флуктуації освітленості, температурні коливання та похибки вимірювальних пристроїв, що робить синтетичний масив більш реалістичним і придатним для тестування алгоритмів аналізу.

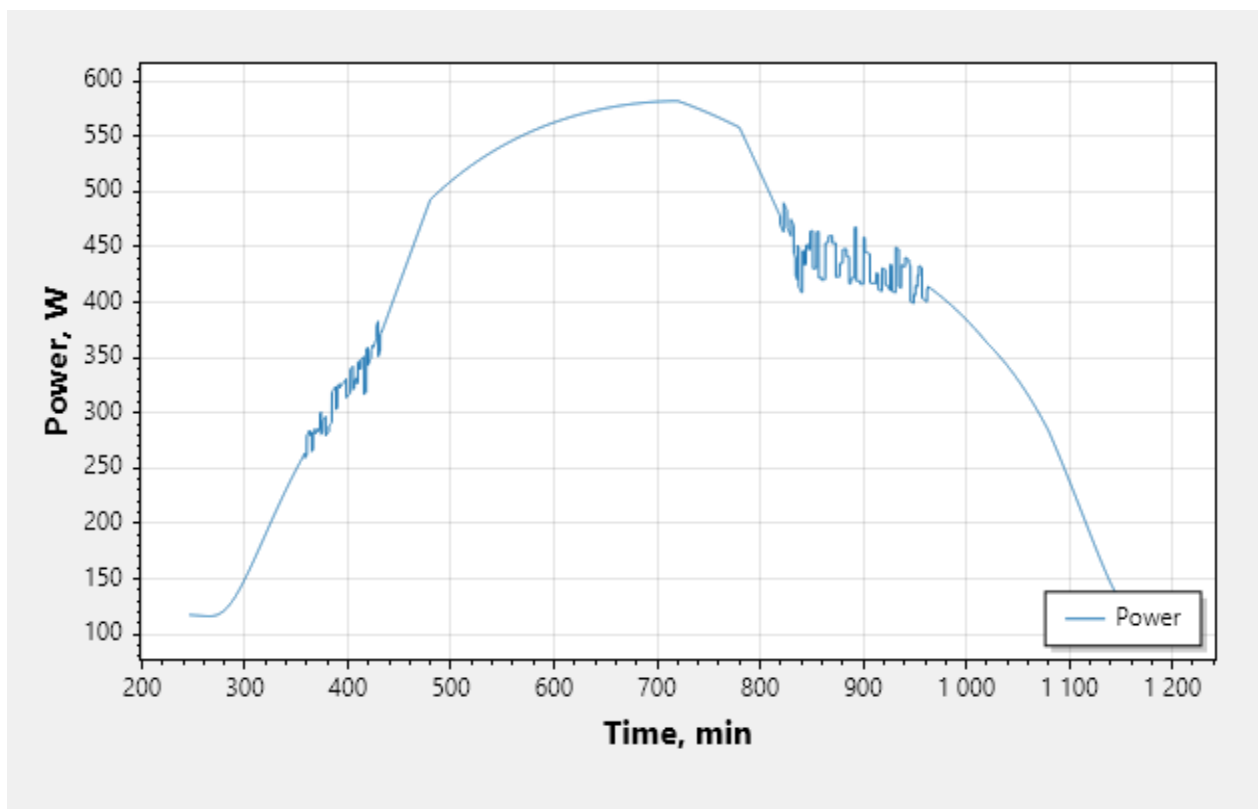


Рис. 4.16 Графік синтетичної залежності потужності від часу

Після завершення обчислень формується текстовий файл, у якому кожен рядок містить дату, значення напруги та струму. Файл автоматично зберігається в

каталозі програми та може бути використаний для подальшого аналізу, розрахунку статистичних параметрів, визначення коефіцієнта хмарності та моделювання роботи системи керування. Приклад синтетичної залежності потужності від часу приведено на рисунку 4.16.

Для визначення коефіцієнта хмарності зі збережених експериментальних чи синтетичних даних необхідно натиснути на кнопку “Відкрити збережений файл”. Експериментальні дані одержані за допомогою розробленого вимірювального пристрою, описаного вище. Експериментально визначений інтервал накопичення даних складає 15 хвилин. Цей параметр визначає часовий інтервал, у межах якого виконується статистичний аналіз миттєвих значень потужності. Інтервал можна змінювати, що дозволяє дослідити чутливість алгоритму до короткочасних змін освітленості. Після вибору користувачем текстового файлу з даними здійснюється його пострядкове зчитування. Кожен рядок починається з часу виміру, а потім йде миттєве значення напруги та струму. Приклад фрагмента даних приведено на рисунку 4.17.

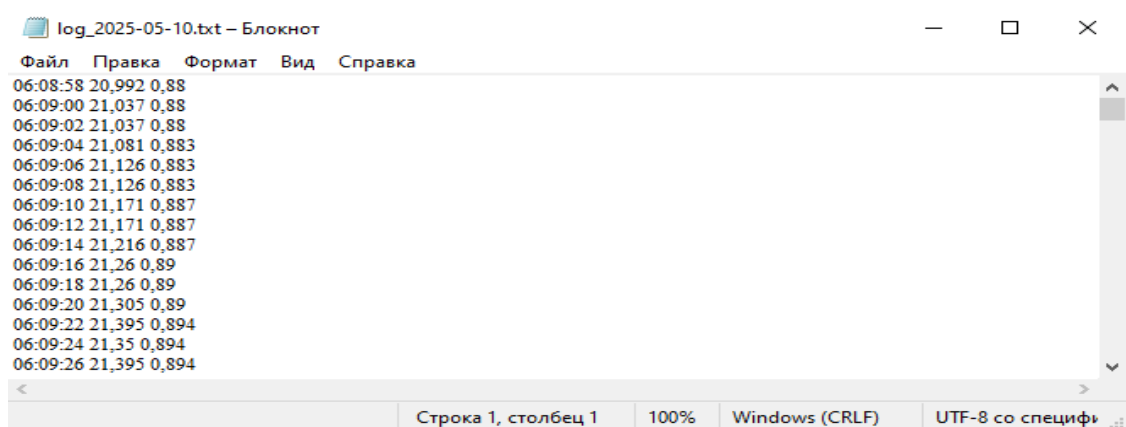


Рис. 4.17 Приклад запису даних у файл

Час перетворюється у формат DateTime, а числові значення в тип double. Для кожного моменту часу обчислюється миттєва електрична потужність як добуток напруги на струм. Таким чином формується часовий ряд потужності, синхронізований з відповідними часовими відмітками.

Для подальшої візуалізації часові мітки переводяться у хвилини від початку доби, що дозволяє представити процес генерації у вигляді неперервної залежності

потужності від часу. Отриманий масив використовується для побудови графіка миттєвої потужності. На наступному етапі по часовим вікнам розраховується коефіцієнт варіації потужності за методикою, описаною у 3 розділі для визначення стану погоди по вікнам.

Для кожного інтервалу додатково визначається центр, що використовується при побудові графіка індексу хмарності. Результати розрахунку виводяться в текстове поле застосунку з інтерпретацією стану атмосфери на основі заданих порогових значень, отриманих експериментально. Після завершення покрокового проходження всього добового масиву формується два графіка. Перший графік відображає часову залежність миттєвої потужності, що дозволяє оцінити генерацію протягом доби. Другий графік демонструє зміну індексу хмарності в центрах відповідних 15-хвилинних інтервалів, забезпечуючи наочну оцінку динаміки атмосферних умов. Результат роботи приведено на рисунку 4.18.

Таким чином, реалізований алгоритм здійснює перехід від первинних електричних вимірювань до статистично обґрунтованого показника нестабільності генерації, який використовується для подальшого аналізу режимів роботи та прийняття рішень у системі керування СФУ.

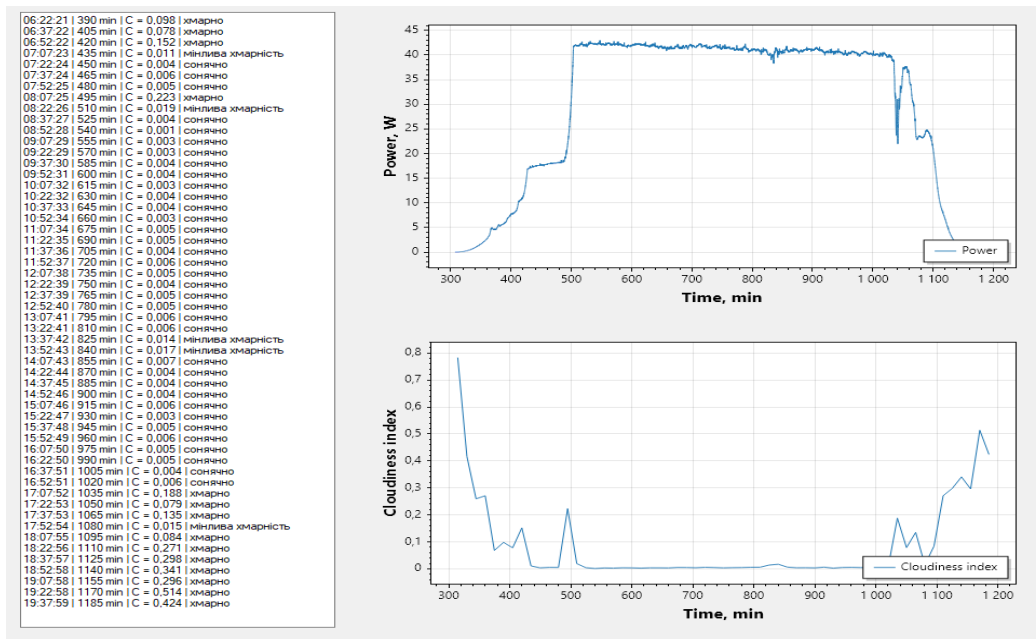


Рис. 4.18 Часові залежності миттєвої потужності та індексу хмарності

Для розрахунку часу роботи мотопідвісів для вибраного файлу з добовими значеннями напруги та струму за алгоритмом екстремального слідкування та за алгоритмом з врахуванням метео-факторів треба натиснути на кнопку “Розрахувати час роботи”. Час роботи мотопідвісів потрібний для визначення ефективності роботи розробленого алгоритму. Для того, щоб розрахувати час роботи мотопідвісів треба провести емуляцію роботи установки за двома алгоритмами.

Для розрахунку часу роботи мотопідвісів СФУ використовується добовий набір даних із значеннями напруги та струму. На основі цих даних здійснюється емуляція роботи СФУ за алгоритмом екстремального слідкування та розробленим алгоритмом з урахуванням метеофакторів. Час роботи мотопідвісів визначає ефективність роботи системи слідкування, дозволяючи порівняти витрати енергії на рух за різних методів керування. Для кожного моменту часу t_i визначаються кути азимуту $\alpha(t_i)$ та висоти Сонця $\varphi(t_i)$ над горизонтом для географічних координат СФУ. На основі висоти Сонця обчислюється кут нахилу $\beta(t_i)$ СФП. При екстремальному слідкуванні кут азимуту $\alpha(t_i) = |\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})|$ та кут нахилу $\beta(t_i) = |\beta(t_i) - \beta(t_{i-1})|$ обчислюються як абсолютні різниці між поточним положенням Сонця та попереднім положенням СФП. Експериментально було визначено, що вал мотопідвіса обертається на кут 160° за 74 секунди, а значить кутова швидкість $\omega = \frac{160^\circ}{74c} = 2.16 \text{ }^\circ/c$. Час роботи мотопідвіса за азимутом $T_\alpha = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta\alpha(t_i)}{\omega_\alpha}$ та кутом нахилу $T_\beta = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta\beta(t_i)}{\omega_\beta}$, та сумарний час $T_\Sigma = T_\alpha + T_\beta$.

Для розробленого алгоритму з урахуванням метеофакторів при щільній хмарності СФП переводиться в горизонтальне положення за умови повної хмарності, тобто $\beta = 0$, при цьому кут переміщення по висоті $\Delta\beta_i = |0 - \beta(t_{i-1})|$. В умовах, відмінних від щільної хмарності, СФП слідкує за Сонцем за екстремально-пошуковим алгоритмом відповідно до розрахованих кутів, наздоганяючи пройдений шлях. У цей момент попередній нахил СФП дорівнює

нулю, тоді переміщення за кутом нахилу $\beta_0(t_i) = |\beta(t_i) - 0|$, а по азимуту, як і при екстремальному слідкуванні, $\alpha_0(t_i) = |\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})|$. Таким чином система одночасно виконує підйом СФП та компенсацію накопиченого кутового відставання по азимуту.

Тоді сумарний час роботи приводів за добу розраховується як сума часу всіх переміщень за екстремальним алгоритмом плюс сумарний час всіх переміщень у

$$\text{горизонтальний стан } T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K \frac{\Delta\alpha_0(t_j)}{\omega_{\alpha}} + \sum_{i=1}^N \frac{\Delta\alpha(t_i)}{\omega_{\alpha}} + \sum_{j=1}^K \frac{\Delta\beta_0(t_j)}{\omega_{\alpha}} + \sum_{i=1}^N \frac{\Delta\beta(t_i)}{\omega_{\alpha}}.$$

Запропонований алгоритм математично вважається як неефективний, але якщо врахувати те, що більшість днів року мають суцільну хмарність, то ефективність полягає в тому, що під час хмарності СФП переходить у горизонтальне положення і припиняє безперервні корекції положення, які в умовах розсіяного випромінювання практично не впливають на генерацію енергії. Оскільки більшість днів року в Україні мають суцільну хмарність, що зазначено в першому розділі на основі погодинних даних хмарності NASA, то цей час СФП буде розташовано горизонтально, при цьому моторесурс мотопідвісів буде зекономлено та на переміщення не буде витрачатись енергія. Навіть у день, коли після переходу від хмарної погоди до сонячної виникає разове наздоганяння по азимуту та куту нахилу, сумарний інтегральний кут переміщення за тривалий період зазвичай менший або співрозмірний з класичним екстремальним слідкуванням. Таким чином зменшується кількість дрібних переміщень, пусків двигуна та сумарний моточас, що знижує енергоспоживання приводів і їхній знос без суттєвої втрати виробітку електроенергії.

Розрахунок генерованої потужності СФП здійснюється на основі дискретних експериментальних чи синтетичних даних із застосуванням методу трапецій, який є одним з найпоширеніших чисельних методів інтегрування.

Миттєві значення потужності реєструються через рівні проміжки часу, що формує часовий ряд дискретних відліків. Оскільки реальний процес генерації потужності є безперервним, а вимірювання проводяться дискретно, виникає

необхідність апроксимації інтегральної характеристики на основі цих дискретних даних.

Сутність методу трапецій полягає в тому, що на кожному інтервалі між двома сусідніми моментами часу залежність потужності від часу апроксимується лінійною функцією. Геометрично це означає, що площа під кривою потужності на кожному інтервалі замінюється площею трапеції, основами якої є значення потужності в початковий та кінцевий моменти інтервалу, а висотою є тривалість цього інтервалу. Таким чином, для кожної пари сусідніх вимірювань визначається площа відповідної трапеції, яка інтерпретується як кількість енергії, виробленої на даному часовому відрізьку.

Після цього всі площі підсумовуються по всьому інтервалу спостереження, що дозволяє отримати інтегральне значення виробленої енергії. Застосування методу трапецій є обґрунтованим у даній задачі, оскільки він забезпечує достатню точність апроксимації при відносно малому кроці дискретизації та добре відтворює реальну динаміку зміни потужності СФП, зокрема в умовах нестаціонарності процесу, спричиненого змінами сонячної радіації та хмарності. Водночас, на відміну від простіших методів, таких як метод прямокутників, метод трапецій враховує зміну значення потужності всередині інтервалу, що зменшує похибку інтегрування та підвищує достовірність отриманих результатів. Для підрахунку потужності за день у застосунку треба натиснути на кнопку “Потужність за день”, а якщо за рік, то кнопку “Потужність за рік”, а далі у вікні, яке відкриється, вказати шлях до даних.

На основі комплексної моделі системи керування було проведено дослідження роботи двох систем - слідкуючої системи, яка весь час тримала поверхню СФП, направлену за нормаллю до променів Сонця та систему (тобто реалізація екстремального регулювання), та системи керування, яка працювала за розробленим алгоритмом. З результатів моделювання, які приведено на рисунку 4.19 вбачається, що при хмарній погоді ефективніше починає працювати система керування, в якій реалізований запропонований алгоритм, у порівнянні з

існуючими системами керування, в яких реалізований алгоритм пошуку екстремуму за потужністю.

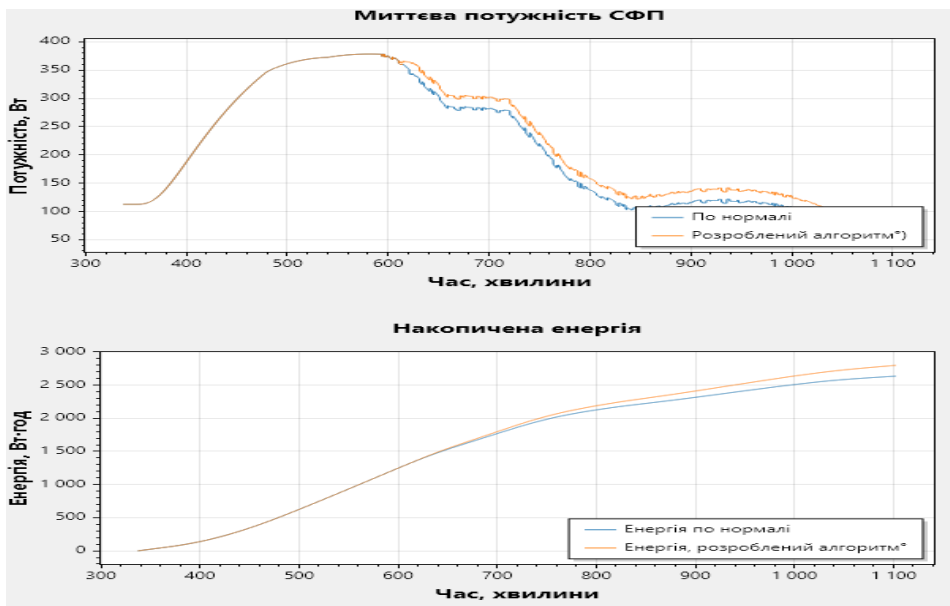


Рис. 4.19 Дослідження роботи розробленої системи керування та системи керування з екстремальним пошуком

Змодельовано конкретний випадок з використанням експериментальних даних для імітації зовнішнього середовища, які були отримані 08 вересня 2025 року. З результатів моделювання видно, що фотоелектрична установка з алгоритмом слідкування за нормаллю до Сонця виробила 2620 Вт·год електроенергії, тоді як із застосуванням розробленого алгоритму з урахуванням хмарності 2804 Вт·год. Приріст генерації становить 184 Вт·год, що відповідає підвищенню ефективності приблизно на 7,02 - відносно використовуваного наразі алгоритму слідкування.

4.7 Перевірка на адекватність розробленої моделі СФУ

Для перевірки адекватності статистичної моделі для досліджуваного процесу, який має виражений нестационарний характер, обрано критерій Колмогорова-Смірнова, оскільки класичні параметричні підходи в умовах змінності статистичних характеристик у часі можуть давати спотворені або залежні від припущень результати. Нестационарність у даному випадку означає, що середні значення, дисперсія та форма розподілу процесу можуть змінюватися в часі під

впливом зовнішніх факторів, таких як змінна хмарність, режим роботи системи або інші стохастичні впливи. Саме тому необхідний метод, який оцінює узгодженість розподілів без жорсткої параметричної структури та без припущення про стаціонарність.

У рамках дослідження розглядаються дві вибірки: експериментальна та синтетична, які можуть мати різну довжину та бути отриманими за різних умов функціонування системи або для різних інтервалів часу. Кожна з цих вибірок інтерпретується як реалізація випадкового процесу з невідомим законом розподілу.

Для їх порівняння використовується підхід, заснований на побудові кумулятивних емпіричних функцій розподілу. Побудова кумулятивної функції починається з впорядкування елементів кожної вибірки за зростанням. Це впорядкування необхідне для формування коректної структури накопичення ймовірнісної маси вздовж осі значень випадкової величини. Після впорядкування кожному елементу ставиться у відповідність його порядковий номер у варіаційному ряді, що дозволяє перейти до відносного опису розподілу.

Далі здійснюється побудова накопичувальної функції шляхом визначення частки спостережень, які не перевищують задане значення. Для кожного елемента впорядкованої вибірки обчислюється кількість значень, менших або рівних поточному, після чого ця величина нормується на загальний обсяг вибірки. У результаті отримується монотонно неспадна ступінчаста функція, яка змінюється від нуля до одиниці та повністю описує емпіричний розподіл даних.

Отримані кумулятивні функції для обох вибірок відображають інтегральну структуру розподілів і дозволяють здійснювати їх безпосереднє порівняння. Основна ідея критерію Колмогорова-Смірнова полягає у визначенні максимальної вертикальної відстані між цими функціями на всій області визначення випадкової величини. Ця відстань інтерпретується як міра найбільшого розходження між двома емпіричними розподілами.

Якщо максимальне відхилення є незначним, робиться висновок про статистичну узгодженість вибірок $H_0 : F_{експеримент}(P) = F_{модель}(P)$ і, відповідно, про

адекватність прийнятої моделі розподілу для опису процесу. Якщо ж відхилення перевищує критичний рівень $D_{\text{критичне}} = c(\alpha) * \sqrt{\frac{n1+n2}{n1*n2}}$, $c(0.05) = 1.36$, це свідчить про суттєву різницю між розподілами та про неадекватність $H_0 : F_{\text{експеримент}}(P) \neq F_{\text{модель}}(P)$ гіпотези їх спільного статистичного походження. На рисунку 4.20 приведено результат перевірки розробленої моделі на адекватність.

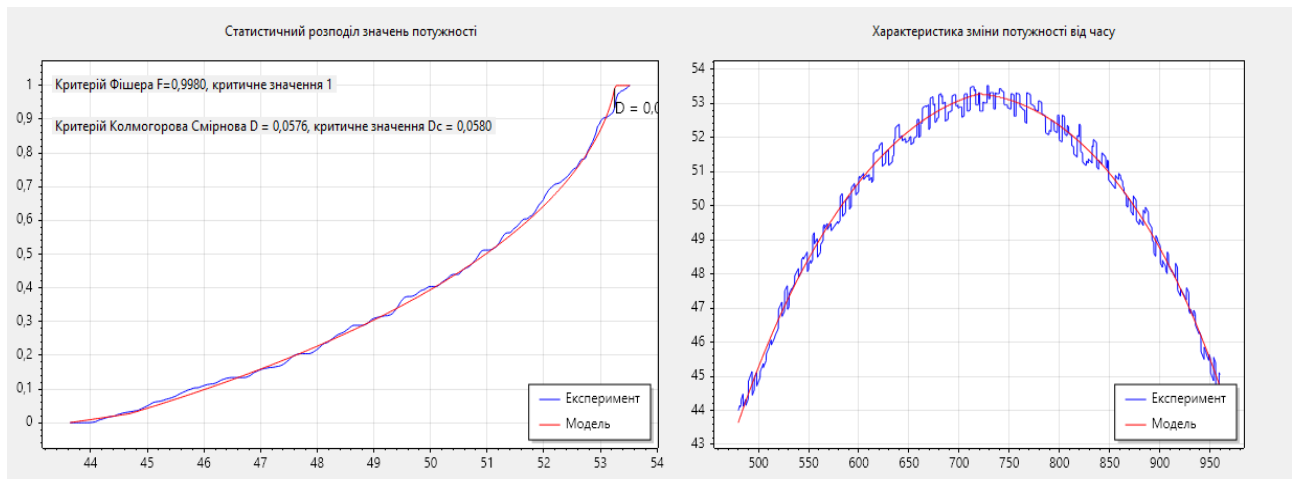


Рис. 4.20 Комулятивні функції вибірок, потужнісна характеристика та результат перевірки на адекватність за критерієм Колмогорова-Смірнова

Отримані значення є практично граничними. Розрахунковий критерій $D_p = 0.0576$ є меншим за критичне значення $D_k = 0.058$. Це означає, що умова прийняття нульової гіпотези виконується, тобто статистичних підстав для відхилення припущення про узгодженість розподілів немає.

Обидві вибірки можуть бути описані однією й тією ж статистичною моделлю з прийнятим рівнем достовірності. Водночас важливо підкреслити, що різниця між критичним і розрахунковим значенням є дуже малою. Це вказує на те, що система знаходиться в зоні граничної узгодженості, де будь-які додаткові дані або зміна умов експерименту можуть призвести до зміни результату перевірки. З прикладної точки зору для нестационарних процесів, зокрема для даних з СФП, це зазвичай означає, що модель в цілому правильно відтворює поведінку процесу, однак, чутлива до локальних відхилень через короточасні зміни хмарності або шумових компонент вимірювання.

Таким чином, критерій Колмогорова-Смірнова є ефективним інструментом аналізу саме для нестационарних процесів, оскільки дозволяє порівнювати вибірки на рівні їх повних розподільних характеристик без необхідності припущення про сталість статистичних параметрів у часі.

4.8 Економічний підхід оцінки ефективності роботи СФУ. Критерій ефективності роботи СФУ.

СФУ з системою позиціонування у просторі є складною системою, у якій сукупна ефективність визначається не лише виробленою електричною енергією, а й витратами на обслуговування механічних та електронних вузлів. В умовах реальної експлуатації, коли вплив хмарності та змінного сонячного випромінювання істотно впливає на генеровану потужність, важливим є підхід, що дозволяє оцінювати доцільність застосування активного трекінгу в контексті енергетичної та економічної ефективності.

Для оцінки ефективності роботи СФУ доцільно використати інтегральний критерій ефективності роботи СФУ, який є різницею між корисною енергією, виробленою системою, та витратами на експлуатацію. У загальному виді розрахувати критерій ефективності можна за формулою 4.12.

$$J_{\text{Ефективне}} = J_{\text{ГЕ}} - J_{\text{ВП}} - J_{\text{ВО}}, \quad (4.12)$$

де $J_{\text{ГЕ}}$ - корисна енергія, вироблена СФП, $J_{\text{ВП}}$ - витрати енергії на переміщення СФП, $J_{\text{ВО}}$ - витрати на технічне обслуговування та ремонт, в перерахуванні на енергію.

Корисна енергія $J_{\text{ГЕ}} = \int_0^T P_{\text{СФП}}(t) dt$ визначається інтегруванням миттєвої вихідної потужності $P_{\text{СФП}}$, яка залежить від рівня сонячної іррадіації, кута падіння променів на СФП, температури та технічних характеристик СФП.

За допомогою розробленого застосунку, опис якого приведено вище, було згенеровано 2 синтетичні вибірки за 2024 рік для СФП потужністю 350 Вт. При екстремальному слідкуванні згенерована потужність за рік склала $J_{\text{ГЕ_Екстремальне}} = 586 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а при розробленому алгоритмі $J_{\text{ГЕ_Оптимальне}} = 602 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Для орієнтації СФП у просторі використано 2 моторизовані підвісні установки стандарту DiSEqC 1.2. Кожен мотор працює від постійного джерела напругою 18 В із середнім струмом під час руху 200 мА. Відповідно, середня потужність одного приводу $P_{Cp} = V * I = 18B * 0.2A = 3.6Bm$. Сумарна потужність двох приводів $P_{C2} = 2 * P_{Cp} = 2 * 3.6 = 7.2Bm$. Витрати енергії на переміщення за період T визначаються як сумарний час активних переміщень приводів. За отриманими даними при моделюванні за 2024 рік було розраховано, що при екстремальному пошуку мотопідвіси працюють за рік $t_{Ekc.} \approx 52год$, а при розробленому оптимальному пошуку $t_{Onm.} \approx 24год$. Енерговитрати на привід за рік при екстремальному пошуку становлять $J_{ВП_Ekc.} = P_{C2} * t_{Ekc.} = 7.2 * 52 \approx 374Bm * год$ та $J_{ВП_Onm.} = P_{C2} * t_{Onm.} = 7.2 * 24 \approx 173Bm * год$. До цієї величини також додаються витрати системи керування, що становлять $44Bm * год$. Але через те, що ці витрати однакові для двох способів управління, то для розрахунку коефіцієнта ефективності цим значенням можна знехтувати. Таким чином, енергетичні витрати на позиціонування СФП при екстремальному пошуці є вдвічі більші, ніж при запропонованому.

DiSEqC 1.2 мотори чи іншого типу керовані редуктори розроблені як електромеханічні приводи з редукторними передачами, виготовленими з корозійностійких матеріалів. За даними виробника та практичними дослідженнями встановлено, що механічні та електричні вузли працюють без збоїв 500 годин за умови регулярного технічного обслуговування. Після напрацювання більше 500 годин мотопідвіси потребують заміни череу появи значних люфтів в механічній частині, зносу щіток двигуна та пошкодження електричної частини конденсатом. Технічне обслуговування включає огляд та очищення контактів і корпусу від пилу та вологи, перевірку стану редуктора і шестерень на предмет зносу та наявності люфтів, змазку рухомих вузлів, перевірку затягування гайок елементів кріплення, герметизацію та захист від зовнішніх впливів, таких як дощ, сніг або підвищена вологість. Рекомендується

виконувати профілактичні роботи через кожні 100 годин роботи, а заміну мотопідвіса на новий через 500 годин роботи.

Профілактичні роботи тривають у середньому близько 30 хвилин. Проте для коректної оцінки витрат необхідно врахувати час в дорозі бригади, який у типовому випадку при розташуванні СФП та відправної точки бригади в межах одного населеного пункту становить приблизно 2 години. Таким чином, повна тривалість одного профілактичного циклу становить $t_{\text{проф}} = 2.5 \text{ год}$. Для розрахунку приймається, що бригада ремонтників складається з двох осіб з погодинною оплатою одного спеціаліста $C_{\text{год}} = 500 \text{ грн}$. Вартість роботи бригади становить $C_{\text{бр.}} = 2 * 500 = 1000 \text{ грн/год}$, а вартість одного профілактичного виїзду $C_{\text{проф}} = C_{\text{бр.}} * t_{\text{проф}} = 1000 * 2.5 = 2500 \text{ грн}$. Кількість профілактичних операцій за рік для екстремального слідкування становить $N_{\text{Проф.Екс.}} = \frac{t_{\text{Екс.рік}}}{t_{\text{проф.рем.}}} = \frac{52}{100} \approx 0.5$, відповідно річні

витрати на профілактичне обслуговування

$C_{\text{Екс.проф.рік}} = N_{\text{Проф.Екс.}} * C_{\text{проф}} = 0.5 * 2500 = 1250 \text{ грн/рік}$, а для розробленого алгоритму

керування СФП кількість профілактичних операцій за рік становить

$N_{\text{Опт.проф}} = \frac{t_{\text{Опт.рік}}}{t_{\text{проф.рем.}}} = \frac{24}{100} \approx 0.24$, відповідно річні витрати на профілактичне

обслуговування $C_{\text{Опт.проф.рік}} = N_{\text{проф}} * C_{\text{Опт.проф}} = 0.24 * 2500 = 600 \text{ грн/рік}$. Отже,

співвідношення фінансових витрат на профілактичне обслуговування для екстремального та запропонованого алгоритмів становить приблизно 2:1.

Повна заміна двох мотопідвісів включає демонтаж, монтаж, механічне налаштування та тестування, а також логістику виїзду бригади. Сумарна тривалість таких робіт складає в сумі $t_{\text{заміна}} = 4 \text{ год}$. Вартість робіт з повної заміни двох приводів $C_{\text{замінароб}} = C_{\text{бр.}} * t_{\text{заміна}} = 1000 * 4 = 4000 \text{ грн}$. З урахуванням ресурсу роботи на відмовлення 500 годин та ціни мотопідвіса 2500 грн, приведені річні витрати на заміну мотопідвісів при екстремальному пошуку

$C_{\text{Екс.замінарік}} = (C_{\text{замінароб}} + n * C_{\text{МП}}) * \frac{t_{\text{Екс.рік}}}{T_{\text{рес}}} = (4000 + 2 * 2500) * \frac{52}{500} = 936 \text{ грн/рік}$, та при

оптимальному пошуку $C_{\text{Опт.замінарік}} = (4000 + 2 * 2500) * \frac{24}{500} = 432 \text{ грн / рік}$. Отже,

співвідношення фінансових витрат на заміну мотопідвісів для екстремального та запропонованого алгоритмів становить приблизно 2:1.

Сумарні експлуатаційні витрати для алгоритму екстремального пошуку складають $C_{\text{Екс.}} = C_{\text{Екс.замінарік}} + C_{\text{Екс.проф.рік}} = 1250 + 936 = 2186 \text{ грн / рік}$. За допомогою енергетичного перетворення отримано значення еквівалентної енергії за рік

$$J_{\text{ВОЕкс.рік}} = \frac{C_{\text{Екс.}}}{C_E} = \frac{2186}{4.32} = 506 \text{ кВт * год}, \text{ та за добу } J_{\text{ВОЕкс.}} = \frac{506}{365} = 1.39 \text{ кВт}, \text{ враховуючи, що}$$

вартість одного кіловату за годину в Україні для м. Дніпра на серпень 2025 року складає $C_E = 4.32 \text{ грн}$. Ефективна енергія вироблена за рік складає

$$J_{\text{Екс.Ефективне}} = 586 - 0.418 - 506 \approx 80 \text{ кВт}.$$

Сумарні експлуатаційні витрати для алгоритму оптимального пошуку складають $C_{\text{Опт.}} = C_{\text{Опт.замінарік}} + C_{\text{Опт.проф.рік}} = 600 + 432 = 1032 \text{ грн / рік}$. Внаслідок

енергетичного перетворення отримано значення еквівалентної енергії за рік

$$J_{\text{ВОЕкс.рік}} = \frac{C_{\text{Опт.}}}{C_E} = \frac{1032}{4.32} \approx 239 \text{ кВт * год}, \text{ та за добу } J_{\text{ВООпт.}} = \frac{239}{365} = 0.655 \text{ кВт}, \text{ враховуючи,}$$

що вартість одного кіловату за годину в Україні для м. Дніпра на серпень 2025 року складає $C_E = 4.32 \text{ грн}$. Ефективна енергія вироблена за рік складає

$$J_{\text{Опт.Ефективне}} = 602 - 0.217 - 239 \approx 363 \text{ кВт * год}.$$

Приріст корисної річної генерації при застосуванні розробленого алгоритму порівняно з екстремальним становить $\Delta J = |J_{\text{Екс.Ефективне}} - J_{\text{Опт.Ефективне}}| \approx 283 \text{ кВт * год}$, тобто приріст корисної згенерованої енергії з врахуванням витрат на позиціонування та сервісне обслуговування за запропонованим алгоритмом становить 354% порівняно з алгоритмом слідкування за Сонцем по нормалі до поверхні СФП.

Річна економія у грошовому еквіваленті $\Delta C_{\text{Рік}} = \Delta J * C_E = 283 * 4.32 \approx 1223 \text{ грн / рік}$.

Якщо врахувати, що вартість модернізації існуючих систем $C_{\text{Сист.}} = 10000 \text{ грн}$, з яких вартість контролера 2000грн, вартість двох мотопідвісів 5000грн, вартість робіт

по встановленню 2500грн, вартість розхідних матеріалів 500грн, то період окупності системи з запропонованим алгоритмом складає

$$M = \frac{C_{\text{сум}}}{\Delta C_{\text{Рік}}} = \frac{10000}{1223} \approx 8.2 \text{ років}.$$

Інвестиції в систему окупаються приблизно за 8 років тільки завдяки додатковій енергії, згенерованій за запропонованим алгоритмом порівняно з екстремальним. Використання тарифного еквіваленту дозволяє оцінити економічну ефективність автономної системи в порівняних грошових одиницях. Розроблений алгоритм не лише збільшує корисну генерацію енергії, а й забезпечує максимальну економічну вигоду порівняно з іншими автономними джерелами.

Крім прямої економії, розроблений алгоритм забезпечує збільшену автономність системи та довший час живлення приладів. Зменшення числа рухів знижує механічне зношення та додатково скорочує експлуатаційні витрати. Таким чином, застосування розробленого алгоритму не лише підвищує генерацію енергії, але й забезпечує надійність, стабільність та економічну доцільність автономної системи, що робить його впровадження обґрунтованим як з технічної, так і з економічної точки зору.

4.9 Реалізація алгоритму пошуку MPP

Сонячне випромінювання є нестабільним через атмосферні впливи та процеси на Сонці, тому для ефективного відбору енергії, яку генерує СФП, необхідно, щоб СФП працювала в MPP. У розробленій програмі для пошуку MPP миттєві значення напруги та струму отримуються з аналогових каналів AN2 і AN3 АЦП мікроконтролера PIC32MX795F512L. Дискретизація сигналів відбувається з періодом 0.1с, що відповідає частоті переривання Timer4 10 Гц. Обрана дискретність забезпечує достатню швидкість реакції на зміни освітлення, дозволяючи уникнути надмірного навантаження на обчислювальні ресурси мікроконтролера.

При старті розроблена програма, код якої приведено в додатку Б, виконує конфігурацію всіх необхідних апаратних модулів. Функція AdcInit() налаштовує АЦП на зчитування сигналів з каналів AN2 та AN3. Вибір каналу зчитування

виконується у функції `AdcRead()`, яка встановлює канал у регістрі `Ad1CHSbits.CH0SA` і очікує завершення конверсії за прапорцем `Ad1CON1bits.DONE`.

Для формування керуючого сигналу на силові ключі використовується широтно-імпульсний модулятор PWM модуля `Output Compare` з виводом сигналу в `OC1`. Частоту роботи PWM задає `Timer2`. Період таймера визначено регістром $PR2 = 1024$, що у поєднанні з тактовою частотою периферійної шини $F_{PB} = 80\text{МГц}$ забезпечує частоту PWM $F_{PWM} = \frac{F_{PB}}{Pr * (PR2 + 1)} = \frac{8 * 10^7}{1 * 1024} \approx 78\text{кГц}$.

Таке значення частоти дозволяє уникнути акустичних шумів і забезпечує достатню роздільну здатність керування, а також швидку реакцію силових перетворювачів. Початковий робочий цикл задається змінною `PwmDuty=512`, що відповідає 50% заповнення. Значення регістру $OC1RS = \frac{PwmDuty * PR2}{PwmLogicMax}$, де `PwmDuty` - це бажаний коефіцієнт заповнення PWM, а `PwmLogicMax` - це максимальне значення для 10біт PWM. Для паралельної генерації аналогового сигналу використано ЦАП `MCP4921`, керований через `SPI`. Значення для `DAC` масштабується з 10-бітного формату PWM до 12-бітного за формулою $DacValue = \frac{PwmDuty * 4095}{PwmLogicMax}$. Установка значення виконується функцією `DacWrite()`, яка через `SPI` відправляє керуюче слово в ЦАП.

Алгоритм `MPPT` виконується в перериванні `Timer4Handler`, що спрацьовує кожні 100 мс. По перериванню відбувається зчитування поточного струму і напруги, обчислення потужності та розрахунок її зміни відносно попереднього циклу $\Delta Power = Power(t) - PrevPower$. Крок зміни визначається за допомогою пропорційного закону керування з нормалізацією $\Delta PWM = k_p * \frac{\Delta Power}{PrevPower}$. Для обмеження надмірних коливань використано обмеження $-15 \leq \Delta PWM \leq 15$, тоді $PwmDuty = PwmDuty + \Delta PWM$. Після цього проводиться масштабування для регістра `OutputCompare` та `DAC`. Попереднє значення потужності `PrevPower` зберігається для наступного циклу.

Алгоритм Pertur&Observe, принцип роботи якого описано та досліджено в розділі 2, розроблений для повільних змін освітлення. Для швидких коливань інсоляції, які виникають у умовах змінної хмарності на території України, цей підхід має суттєві обмеження. Постійний крок Step може бути надто малим при раптових змінах освітлення, що сповільнює пошук MPP, або надто великим при дрібних коливаннях, викликаючи автоколивання і нестабільність робочого циклу. У запропонованому алгоритмі реалізується адаптивний підхід, де крок регулювання змінюється пропорційно нормалізованій зміні потужності, що дозволяє забезпечувати швидку адаптацію до великих змін інсоляції. Такий алгоритм реалізовано за допомогою пропорційного закону регуляції. Такий підхід суттєво зменшує час досягнення MPP порівняно з класичним алгоритмом Pertur&Observe, де крок змінюється постійно і не адаптується до величини градієнта.

Класичні регулятори PI, PD або PID не використовуються через низку причин. Інтегральна складова PI накопичує помилки при раптових змінах інсоляції, викликаючи нестійкість, похідна PD або PID сильно реагує на високочастотні коливання потужності, характерні для хмарності, що може призвести до автоколивань керуючого сигналу. Дискретна адаптивна схема з пропорційним законом дозволяє уникнути цих проблем, реалізуючи ефективне градієнтне керування без інтегральної або похідної складової, що забезпечує стабільність, простоту програмної реалізації та мінімальне навантаження на мікроконтролер.

Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує зчитування значення напруги та струму, обчислює значення потужності та її дискретної похідної, нормалізує зміни потужності, виконує пропорційний розрахунок кроку регулювання, та формує керуючі впливи, які подаються на DC-DC перетворювач, розроблений під час виконання даного дослідження та описаний в розділі 2. Без цього рішення неможливо отримати реальне значення генерованої потужності СФП протягом доби, яке потрібне для досліджень у цій роботі.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено опис розробленої та зібраної механічної конструкції трекеру, яка позиціонує СФП у двох ортогональних площинах, що дозволяє змінювати нахил і азимут СФП залежно від положення Сонця. Розроблено структурну схему системи керування положенням СФП.

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, що забезпечує реалізацію запропонованого алгоритму. Алгоритм дозволяє визначати оптимальний режим позиціонування СФП у просторі як при ясній погоді, так і при хмарній. Такий підхід дозволяє мінімізувати зайві переміщення мотопідвісів, підвищує довговічність механізмів та оптимізує енергетичний баланс автономної системи. Програма не потребує високопродуктивного процесора або великого обсягу оперативної пам'яті, оскільки обчислення виконуються періодично з інтервалом 15 хвилин і включають базові тригонометричні операції та аналіз простих змінних освітленості. Важливо, що відсутність необхідності у GPS-модулі або складних сенсорних систем спрощує апаратну архітектуру та підвищує надійність системи в польових умовах. Досліджено фактори, які впливають на ефективність роботи СФП.

Для перевірки працездатності алгоритму було створено окрему програму тестування на основі розробленої моделі у другому розділі, що дозволяє моделювати різні сценарії зміни хмарності. Тестування показало, що розроблений алгоритм ефективно знижує кількість зайвих переміщень, підтримує оптимальне положення СФП за будь-яких погодних умов і забезпечує зростання корисної генерації порівняно з екстремальним режимом слідкування. Результати моделювання дозволили визначити кількісні показники ефективності.

Для підтвердження економічної ефективності впровадження практичних результатів за дисертацією було проведено моделювання роботи СФУ для різних алгоритмів керування положенням СФП, у результаті чого отримано такі річні обсяги генерації електроенергії: для системи з фіксованим положенням - 638 кВт·год, для астрономічного стеження - 825 кВт·год, для гібридного алгоритму - 862 кВт·год, для методу екстремального пошуку - 857 кВт·год, тоді як

запропонований алгоритм забезпечив максимальну генерацію на рівні 961 кВт·год. Отримані результати свідчать, що використання адаптивного підходу, заснованого на аналізі коефіцієнта варіації потужності, дозволяє більш ефективно враховувати вплив атмосферних факторів, зокрема хмарності, та обирати оптимальний режим роботи системи. У порівнянні з фіксованою СФП приріст генерації є суттєвим, а відносно класичних та відомих методів керування досягається додаткове підвищення енергетичної ефективності. Висновок полягає в тому, що запропонований алгоритм забезпечує найкращий баланс між генерацією електроенергії та витратами на керування, що підтверджує його доцільність для використання в системах автоматичного керування СФУ, особливо в умовах змінної хмарності.

При тарифі на електроенергію 4,32 грн за 1 кВт*год річна економія, яку забезпечує розроблений алгоритм керування, складає приблизно 1223 грн. При капіталовкладеннях на рівні 10000 грн орієнтовний період окупності системи становить близько 8 років, що робить проект фінансово обґрунтованим. Завдяки зменшенню частоти переміщень СФП знижуються експлуатаційні витрати на обслуговування механізмів мотопідвісів, підвищується надійність та довговічність системи, що особливо важливо для віддалених від населених пунктів автономних СФУ без доступу до електромережі та обслуговуючого персоналу. Технічна доцільність впровадження системи підтверджується мінімальними вимогами до апаратного забезпечення. Використання мотопідвісів дозволяє досягти поступового та точного позиціонування СФП при помірному енергоспоживанні, а керування на основі оцінки хмарності забезпечує баланс між приростом генерації та ресурсами приводу. Розроблена система сумісна з типовими одновісними та двовісними трекерними механізмами і може бути інтегрована без істотної модернізації. Відсутність складних зовнішніх сенсорів та GPS забезпечує автономність, підвищує стабільність роботи та скорочує витрати на монтаж і експлуатацію.

Таким чином, розробка та впровадження розробленого алгоритму керування положенням СФП у просторі з урахуванням хмарності, реалізованого на мотопідвісах, є технічно та економічно обґрунтованим рішенням.

Система дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності, зменшити механічне зношування приводів, скоротити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну автономну роботу в польових умовах. Проведене моделювання, тестування та економічна оцінка підтвердили, що запропоноване рішення є придатним до практичного впровадження і забезпечує оптимальний баланс між технічною складністю, ефективністю генерації та фінансовою доцільністю.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності забезпечують розв'язання актуального наукового завдання створення нового підходу щодо автоматичного керування просторовим положенням СФП на основі розпізнавання поточних метеорологічних умов, що забезпечить підвищення ефективності функціонування малопотужних віддалених СФУ в умовах змінної інсоляції та хмарності.

Актуальність проведеного дослідження зумовлена тим, що реальні умови експлуатації СФУ характеризуються значною варіабельністю інсоляції, яка визначається як астрономічними факторами, так і динамікою атмосферних явищ. При цьому традиційні підходи до підвищення ефективності генерації, зокрема використання систем безперервного стеження за Сонцем, не враховують змінну структуру сонячного випромінювання, що призводить до нераціонального використання енергетичних і технічних ресурсів.

У роботі доведено, що ефективність функціонування СФП визначається не лише геометрією орієнтації відносно Сонця, але й співвідношенням прямої та розсіяної складових випромінювання, яке істотно змінюється під впливом хмарності. У ході дослідження встановлено, що за умов значної хмарності, коли розсіяна складова сонячного випромінювання стає домінуючою, горизонтальне положення СФП забезпечує більший рівень генерації електричної енергії порівняно з положенням, орієнтованим за нормаллю до променів Сонця. Отриманий результат має принципове значення, оскільки він демонструє обмеженість застосування класичних алгоритмів трекінгу та обґрунтовує необхідність переходу до адаптивних стратегій керування, що враховують поточні метеорологічні умови. На основі цього положення сформовано новий критерій ефективності функціонування малопотужних ізольованих СФУ, який, на відміну від існуючих, враховує не лише величину згенерованої електроенергії, але й енергетичні витрати на переміщення СФП, а також витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням і зношуванням механічних елементів.

У роботі вперше запропоновано використання вибіркового коефіцієнта варіації генерованої СФП потужності як інформативного параметра для оперативної оцінки ступеня хмарності. Продемонстровано, що цей показник дозволяє адекватно відображати рівень нестабільності інсоляції та може бути використаний як узагальнений індикатор динаміки змін освітленості. Розвинено підхід до аналізу процесів генерації шляхом використання статистичних характеристик сигналу потужності, зокрема дисперсії та середньоквадратичного відхилення, що дозволяє оцінювати амплітуду коливань відносно середнього значення. Також встановлено, що застосування спектрального аналізу з використанням перетворення Фур'є дозволяє виділяти домінуючі частотні складові, пов'язані з проходженням хмар, а також визначати характерні часові інтервали зміни інсоляції. Використання відношення енергії високочастотних компонент до повної енергії спектра як індексу хмарності дозволяє кількісно оцінювати ступінь короткочасних флуктуацій та підвищує інформативність алгоритмів керування.

Вагомим результатом роботи є розроблення способу та відповідного алгоритму керування просторовим положенням СФУ, який базується на розпізнаванні ступеня хмарності. На відміну від існуючих підходів, запропонований алгоритм передбачає дискретне коригування положення СФП із заздалегідь визначеним часовим інтервалом, що забезпечує досягнення компромісу між приростом корисної енергії та витратами на переміщення.

Доведено, що безперервне стеження за Сонцем в умовах змінної хмарності призводить до надлишкових переміщень, збільшення енергоспоживання та прискореного зношування приводів, тоді як дискретне керування дозволяє зменшити інтенсивність роботи механічної системи без втрати ефективності генерації. Встановлено, що за ясних погодних умов доцільним є орієнтування СФП на розрахункове положення Сонця, тоді як за умов хмарності небосхилу ефективним є перехід до горизонтального положення СФП, що забезпечує максимальне використання розсіяного випромінювання.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів розроблено імітаційну модель функціонування СФУ, яка інтегрує астрономічні розрахунки положення Сонця, модель інсоляції з урахуванням хмарності, модель одного діода, алгоритм позиціонування СФП у просторі, енергетичні витрати на його перміщення. Особливістю імітаційної моделі є використання погодинних значень ступеня хмарності, отриманих із супутникових даних NASA, зокрема з Global Cloud Composite та даних Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, що дозволяє максимально наблизити умови моделювання до реальних. Використання процедур згладжування вихідних даних забезпечує формування безперервних кривих іррадіації, що відповідають фізичній природі процесу.

Для обґрунтування доцільності зміни просторового положення СФП з урахуванням стану хмарності на основі моделі здійснено розрахунок добових кривих потужності СФП, досліджено вплив кута падіння сонячного випромінювання на генеровану потужність СФП, а також проаналізовано режими роботи як у точці максимальної потужності, так і за умови підключення до різних типів навантажень.

Математичне моделювання електричних характеристик СФП здійснюється з застосуванням моделі одного діода, яка враховує генерацію фотоструму, нелінійні властивості р-n переходу, вплив температури та внутрішніх опорів. Це дозволяє отримувати вольт-амперні та потужнісні характеристики, визначати точку максимальної потужності та оцінювати ефективність роботи системи в різних режимах.

Встановлено, що врахування нелінійних ефектів є необхідною умовою для точного відтворення процесів генерації та забезпечення достовірності результатів моделювання.

Практична реалізація запропонованого підходу здійснена у вигляді програмного забезпечення, яке забезпечує виконання алгоритму керування в реальному часі. Показано, що алгоритм не потребує використання високопродуктивних обчислювальних засобів, складних сенсорних систем або GPS-модулів, що значно спрощує апаратну реалізацію та підвищує надійність

системи. Використання дискретного режиму обчислень з заданим часовим кроком дозволяє знизити обчислювальне навантаження та енергоспоживання, що є важливим для автономних систем. Результати моделювання та експериментальних досліджень підтвердили працездатність і ефективність запропонованого підходу. Модель пройшла перевірку на адекватність за допомогою критерію узгодженості Колмогорова-Смірнова. Встановлено, що система здатна адекватно визначати рівень хмарності, адаптувати режим керування та забезпечувати ефективну роботу СФП.

Показано, що використання розробленого алгоритму дозволяє зменшити кількість зайвих переміщень, знизити енергетичні витрати на приводи, підвищити ресурс механічної системи та забезпечити стабільну генерацію електроенергії в умовах змінної інсоляції.

Отримані результати демонструють зростання річної генерації електроенергії порівняно з екстремальним режимом стеження, що підтверджує ефективність підходу. Виконана економічна оцінка підтвердила доцільність впровадження розробленого алгоритму керування. Показано, що підвищення виробітку електроенергії в поєднанні зі зниженням експлуатаційних витрат забезпечує позитивний економічний ефект і прийнятний термін окупності системи. Зменшення частоти переміщень сприяє підвищенню надійності та довговічності механічних вузлів, що особливо важливо для автономних фотоелектричних установок, які експлуатуються у віддалених умовах без постійного технічного обслуговування.

Отже, в дисертаційній роботі сформовано цілісний науково обґрунтований підхід щодо підвищення ефективності роботи СФУ, який базується на поєднанні математичного моделювання, статистичного та спектрального аналізу і адаптивного керування. Отримані результати мають практичну цінність для розроблення і впровадження систем трекінгу, що забезпечують підвищення енергетичної ефективності, надійності та економічної доцільності використання сонячної енергії. Результати дисертаційної роботи впроваджені на об'єктах НТУ "Дніпровська політехніка".

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rathore N., Panwar N. L., Yettou F., Gama A. A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications // *International Journal of Ambient Energy*. 2021. Vol. 42, No. 10. P. 1200-1217. DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>
2. Hafez A. Z., Yousef A. M., Harag N. M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 754-782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
3. Osman S. R., Rahim N. A., Selvaraj J. Modeling and control of a photovoltaic powered street lighting system. *Journal of Power Electronics*. 2015. Vol. 15, No. 4. P. 929–937. DOI: 10.6113/JPE.2015.15.4.929
4. El-Faouri F. S., Sharaiha M., Bargouth D. A smart street lighting system using solar energy. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*. 2016. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2016.7856255
5. Tan S. H., Chan J. H., Fadzil L. M., Ishak M. K. Solar powered LED lighting system with motion sensor for energy efficient outdoor applications. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2024. Vol. 11, No. 9. DOI: 10.14445/23488379/IJEEE-V11I9P121
6. Bora S., Kumbhare K. Autonomous solar powered street lighting system with energy storage. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023. DOI: 10.22214/ijraset.2023.56678
7. Freddy F., Rahim N. A. Intelligent control system for decentralized solar powered lighting applications. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2025. DOI: 10.1080/19397038.2025.2453934
8. Liu B.Y.H., Jordan R.C. *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation* (1960)
9. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. DOI: 10.1002/9781118671603
10. Shah I. A., Khalid W., Ahmed T. та ін. Energy yield and economic analysis of tracker controlled and fixed angle photovoltaic solar power system // *Universal Journal*

- of Electrical and Electronic Engineering. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.13189/ujeeee.2017.050302>
11. Mosaad R. та ін. Performance evaluation of fixed and sun-tracking photovoltaic systems integrated with spray cooling // *Solar Energy*. 2025. Vol. 288. Art. 113310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113310>
12. Nurzhigit Kuttybay, Saad Mekhilef Assessment of solar tracking systems: A comprehensive review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103879>
13. Xiao W., Dai J., Wu H. et al. Effect of meteorological factors on photovoltaic power forecast based on the neural network // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 55846–55850. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7RA10591F>
14. Farahmand M. Z., Nazari M. E., Shamlou S., Shafie-khah M. The simultaneous impacts of seasonal weather and solar conditions on PV panels electrical characteristics // *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 4. Art. 845. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14040845>
15. Investigation of weather conditions on the output power of various photovoltaic systems // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 217. Art. 119202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119202>
16. Numan A. H., Dawood Z. S., Hussein H. A. Theoretical and experimental analysis of photovoltaic module under clouds effects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 765. Art. 012011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/765/1/012011>
17. Haro K., Compaore A., Kabore A. et al. Experimental and numerical study of the effect of cloud cover on the electrical performance of photovoltaic plants // *IRA-International Journal of Applied Sciences*. 2020. Vol. 19, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.21013/jas.v19.n1.p1>
18. Jiang Y., Yi B. An assessment of the influences of clouds on the solar photovoltaic potential over China // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 1. Art. 258. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15010258>
19. Комар В. О., Лежнюк П. Д., Лесько В. О., Гунько І. О., Смагло І. І. Програмно-апаратний комплекс діагностування технічного стану обладнання

- фотоелектричних станцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2022. – № 2 (5). – С. 43–50. – DOI: 10.20998/2224-0349.2022.02.05.
20. Jacobson M. Z., Jadhav V. Solar panel tilt angle and efficiency: Impacts on photovoltaic energy generation // *Solar Energy*. 2018. Vol. 169. P. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030>
21. Kacira M., Simsek M., Babur Y., Demirkol S. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey // *Renewable Energy*. 2004. Vol. 29, No. 8. P. 1265–1275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.014>
22. Yadav A. K., Chandel S. S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 503–513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>
23. Stanciu C., Stanciu D. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the world - A declination dependence approach // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 81. P. 133–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.016>
24. Hasan D. S., Farhan M. S., Alrikabi H. Impact of cloud, rain, humidity, and wind velocity on PV panel performance // *Wasit Journal of Engineering Sciences*. 2022. Vol. 10, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol10.Iss2.237>
25. Torres M., Crichigno J. Influence of reflectivity and cloud cover on the optimal tilt angle of solar panels // *Resources*. 2015. Vol. 4, No. 4. P. 736–752. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources4040736>
26. Jiang Y., Yi X. An assessment of the influences of clouds on the solar photovoltaic potential over China // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 1. P. 258. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15010258>
27. Muneer T., Younes S., Kubie J. A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions // *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35, No. 4. P. 780–787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.018>
28. Sahu A., Yadav N., Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 66. P. 815–824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>

29. Sayago S., Ovando G., Almorox J., Bocco M. Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its accuracy considering atmospheric transparency // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1650986>
30. Коваль В., Орбчук Б., Буняк О., Гетманюк В. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 343, № 6(1). С. 208–214. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-32>
31. Гавриленко Є. Аналіз ефективності використання геліосистем на об'єкті з фотоелектричними модулями та сонячним колектором в м. Києві // *Енергетична ефективність та енергозбереження*. 2023. № 2. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279665>
32. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина I. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі: підручник. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. - 150с.
33. Musong L. Katche, Augustine B. Makokha, Siagi O. Zachary, Muuyiwa S. Adaramola. A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar
34. Климишин І. А., Гарбузов Г. О., Мурніков Б. О., Кабанова Т. І.. *Астрономія: навчальний посібник* / - Одеса : Астропринт, 2012. - 352 с.
35. Андрієвський С.М., Климишин І.А. *Курс загальної астрономії. Навчальний посібник*. Одеса: Астропринт, 2007. 476 с.
36. Захожай В.А., Захожай О.В. *Основи елементарної астрономії: навчальний посібник*. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021. 232 с.
37. Андрієвський С. М., Климишин І. А. *Курс загальної астрономії: підручник для студ. вузів*. ОНУ ім. І.І. Мечникова, Прикарпатський нац. ун-т ім. В. Стефаника. — Одеса : Астропринт, 2010. - 475 с.
38. Панько О.О., Сергієнко О. Г. *Загальна астрономія. Навчальний посібник*. Одеса: ОНУ ім. І.І. Мечникова, 2020. 128 с. ISBN 978-617-689-390-5

39. Климишин І.А. Астрономія. Практикум. Львів: Світ, 1996. 248 с. ISBN 5-7773-0265-3
40. Андрієвський С.М., Кузьменков С.Г., Захожай В.А., Климишин І.А. Загальна астрономія. Харків: ПромАрт, 2019. 524 с. ISBN 978-617-7634-37-8
41. Бусарова Т. М. та ін. Вища математика. Математичний аналіз. Частина 1. – Дніпро, 2023.
42. Щерба А. І., Нестеренко А. М. та ін. Математичний аналіз : навчальний посібник. – Черкаси : ЧДТУ, 2023. – 513 с.
43. Астрономічний календар 2026 / ред. кол. НАН України. – Київ : Академперіодика, 2025. – 244 с.
44. Jenkins A. The Sun's position in the sky. – European Journal of Physics, 2013.
45. Reda I., Andreas A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. Solar Energy, 76(5), 577–589, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>
46. Grena R. An algorithm for the computation of the solar position. Solar Energy, 82(5), 462–470, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.001>
47. Huang W., Liu B. Solar Position Algorithm Based on the Kepler Equation. Applied Sciences, 12(11), 5449, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12115449>
48. Antonanzas-Torres F. et al. Review of photovoltaic power forecasting. Solar Energy, 136, 78–111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069>
49. Yefimenko A., Prisyazhniuk L. Models and algorithms for optimizing solar battery location Technology and design in electronic equipment DOI: <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.24>
50. Гальчак В. П. та ін. Сонячна енергія та інсоляція.-Львів : Магнолія, 2024.-242с.
51. Рибченко Л. С., Ревера Т. О. Сумарна сонячна радіація та альbedo підстильної поверхні в Україні / Л. С. Рибченко, Т. О. Ревера. – Київ : УкрНДГМІ НАН України, 2007.
52. Gueymard, C. A., Thevenard, D. (2013) Revising ASHRAE climatic data for design and standards – Part II: Clear-sky solar radiation model ASHRAE Transactions, 119(2)
53. Hottel, H.C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres Solar Energy, 18(2), 129–134 (1976)

54. Ineichen, P., Perez, R. (1999) Modeling clear-sky global and beam solar irradianceSolar Energy DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9)
55. Ineichen P., Perez R. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient // Solar Energy. 2002. Vol. 73, No. 3. P. 151–157. DOI: 10.1016/S0038-092X(02)00045-2.
56. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance // Solar Energy. 1990. Vol. 44, No. 5. P. 271–289. DOI: 10.1016/0038-092X(90)90055-H.
57. Castro, R., Silva, M. Experimental and theoretical validation of one diode and three parameters–based PV models // Energies. 2021.DOI: 10.3390/en14082140
58. Abdulrazzaq A. K., Bognár G., Plesz B. Enhanced single-diode model parameter extraction method for photovoltaic cells and modules based on integrating genetic algorithm, particle swarm optimization, and comparative objective functions // Journal of Computational Electronics. 2025. DOI: 10.1007/s10825-025-02282-w
59. Ali M. S., Kazmi S. M. R. An accurate analytical approach for the parameterization of the single diode model of photovoltaic cell // arXiv preprint. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.06698>
60. Chan D. S. H., Phang J. C. H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters // IEEE Transactions on Electron Devices. 1987. Vol. 34, No. 2. P. 286–293.DOI: 10.1109/T-ED.1987.22920
61. Ishaque K., Salam Z., Taheri H. Accurate MATLAB simulink PV system simulator based on a two-diode model // Journal of Power Electronics. 2011. Vol. 11, No. 2. P. 179–187.DOI: 10.6113/JPE.2011.11.2.179
62. Ma T., Wang H., Yang L., Liu Y. Accurate three-diode model estimation of photovoltaic modules using a novel circle search algorithm // Energy Conversion and Management. 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115XXX
63. Xiong G., Zhang J., Shi D. et al. Parameter extraction of three-diode photovoltaic models using an improved ELSHADE-INR algorithm // Energy. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120XXX

64. Li W., Chen X., Zhao Y. Development of triple-diode based generalized photovoltaic model // *Renewable Energy*. 2025. DOI: 10.1016/j.renene.2025.0XXXX
65. Alqahtani A., El-Sayed A., Hassan M. Parameter estimation of three-diode photovoltaic model using hybrid RLPO–ASM method // *Sustainability*. 2024. DOI: 10.3390/su162310603
66. Singh P., Kumar R., Patel S. Parameter identification of triple-diode photovoltaic model using DEA–EMA hybrid optimization // *Electronics*. 2024. DOI: 10.3390/electronics8060119
67. Ali M. H., Zakaria M., El-Tawab S. A comprehensive study of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems // *Scientific Reports*. - 2025. - Vol. 15, Art. 14269. DOI: 10.1038/s41598-025-96247-5
68. Guanghua L., Arsalan M. S., Syed H. H. S., Shoaib S., Piotr M. Maximum power point tracking strategies for solar PV systems: A review of current methods and future innovations // *Renewable Innovation in Engineering*. 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107227
69. Worku M. Y. A comprehensive review of recent maximum power point tracking control methods for PV systems // *Marine Science and Engineering*. — 2024. — Vol. 12, No. 12, Art. 2121. — DOI: 10.3390/ms12(12)2121
70. Зибалов Д.С., Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача // *Енергетика і автоматика*, №5 2022 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б").
71. Зибалов Д. С., Соснін К. В. Підвищення ефективності фотоелектричного перетворювача методом пошуку точки максимальної потужності // *Енергетика і автоматика*. 2025. № 5 (81). С. 103 DOI:10.31548/energiya5(81).2025.103.
72. Smith S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. – San Diego: California Technical Publishing, 1997. – 650 p.
73. Peter J. Brockwell, Richard A. Davis. *Introduction to Time Series and Forecasting*. - 3rd ed. – Cham: Springer, 2016. - 425 p. - (Springer Texts in Statistics). – DOI: 10.1007/978-3-319-29854-2.

74. Горкавий В. К. Статистика: Підручник. Третє вид., переробл. і доповн. — Київ: Алерта, 2020. - 644 с. - ISBN 978-617-566-579-4.
75. Lynch K. M., Marchuk N., Elwin M. L. Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32 Microcontroller. — Oxford: Newnes (Elsevier), 2015. — 650 p. — DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09898-2>
76. Frenzel L. E. Jr. Handbook of Serial Communications Interfaces. — Oxford: Newnes, 2016. 512 p. ISBN 978-0-12-800629-0. DOI:10.1016/C2013-0-18533-9.
77. Eutelsat. DiSEqC Bus Specivication. Version 4.2. — Paris: European Telecommunications Satellite Organization, 1998. — 28 p.
78. Зибалов Д.С. Метод вимірювання хвильового опору каоксиального дроту. XV Міжнародна науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2025.
79. McGrath M. C# Programming in easy steps. 3rd Edition. — In Easy Steps Limited, 2022. - 381 p. - ISBN 978-1840789737.
80. Матвієнко М. П. Основи електротехніки та електроніки: підручник. — Київ: Ліра-К, 2024. - 331 с. - ISBN 2000988915400.
81. Гуржій А. М., Мещанінов С. К., Нельга А. Т., Співак В. М. Електротехніка та основи електроніки: підручник. - Київ: Кондор, 2013. 416 с.
82. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка. Теорія і практикум: підручник. - Київ: Каравела. : Каравела, 2018. 440 с.
83. Зибалов Д.С. Вимірювання опору за допомогою розбалансованого вимірювального моста Уйтсона. - Енергетика і автоматика, №2, 2024р . (Наукове фахове видання України (Категорія "Б").URL : [https://DOI.10.31548/energiya2\(72\).2023.162](https://DOI.10.31548/energiya2(72).2023.162)
84. Vasilevskyi O. M., Kucheruk V. Yu., Volodarskyi Ye. T. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник. -Вінниця: ВНТУ, 2015. -230 с.
85. Кухарчук В. В., Кулик А. Я., Лежнюк П. Д. Основи метрології та електричних вимірювань: конспект лекцій. — Вінниця: ВНТУ, 2020. -148 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

Основні наукові результати та практичні розробки дисертаційної роботи були опубліковані в журналах:

1. Д.С. Зибалов, “Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача”, Енергетика і автоматика, №5 2022 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>

2. Д.С. Зибалов, “Вимірювання опору за допомогою розбалансованого вимірювального моста Уйтсона”, Енергетика і автоматика, №2, 2024р . (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya2\(72\).2024.162](https://doi.org/10.31548/energiya2(72).2024.162)

3. Д.С. Зибалов, К.В. Соснін, “Підвищення ефективності фотоелектричного перетворювача методом пошуку точки максимальної потужності ”, Енергетика і автоматика, №5 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya5\(81\).2025.103](https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.103)

4. Д.С. Зибалов “Моделювання сонячного фотоелектричного перетворювача в спеціалізованому програмному середовищі MATLAB”, Енергетика і автоматика, №6 2025 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

URL: [https://doi.org/10.31548/energiya6\(82\).2025.100](https://doi.org/10.31548/energiya6(82).2025.100)

5. Д.С. Зибалов, “Вплив кута нахилу сонячного фотоелектричного перетворювача на генеровану потужність в умовах хмарності та статистичний критерій доцільності трекінгу”, Енергетика і автоматика, №2 2026 р. (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

Матеріали дисертації оприлюднено на конференціях з публікацією тез:

1. Зибалов Д.С. Моделювання алгоритма МРР в MATLAB. Молодь: наука та інновації: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 12–14 листопада 2025 року: у 3-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. Том 2. 378 с.;

2. Зибалов Д.С. Оптимізована методика розрахунку магнітного підсилювача з тороїдальним сердечником для регулювання напруги. Молодь: наука та інновації 2024 матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

3. Зибалов Д.С. Метод вимірювання хвильового опору коаксіального дроту. 175 ст. «Наукова весна» 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

4. Зибалов Д.С. Протоколи обміну інформацією у системах інтернет речей «Наукова весна» 2023: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 1–3 березня 2023 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

5. Зибалов Д.С. Методика побудови інформаційної системи інтернет речей. Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2022 – 572 с.

ДОДАТОК Б

Лістинг програм для МК `pic32mx795f5121-80I/PT`.

Лістинг програми для реалізації розробленого алгоритму керування.

```

#include <xc.h>
#include <sys/attribs.h>
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>
#include <math.h>
// СИСТЕМНІ ПАРАМЕТРИ
// Тактова частота ядра мікроконтролера (80 МГц)
#define SYSTEM_FREQUENCY 80000000UL
// Частота периферійної шини (PBCLK = SYSCLK)
#define PB_CLOCK 80000000UL
// Період таймера Timer5.
// При переддільнику 1:256 забезпечує інтервал  $\approx 2$  секунди
#define TIMER5_PERIOD 625000
// Максимальне значення 12-бітного АЦП
#define ADC_MAX_VALUE 4095.0f
// Опорна напруга АЦП
#define ADC_VREF 3.3f
// Коефіцієнт подільника напруги (масштабування вимірної напруги)
#define VOLTAGE_DIVIDER_GAIN 10.0f
// Опір шунта для вимірювання струму
#define SHUNT_RESISTANCE 0.1f
// Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача струму
#define CURRENT_AMPLIFIER_GAIN 10.0f
// Кількість вибірок для статистичного аналізу
// (450 вибірок  $\times 2$  с  $\approx 15$  хвилин)
#define SAMPLE_COUNT 450
// Мінімальний поріг потужності (відсікання шуму)
#define MIN_POWER_THRESHOLD 5.0f
// Порогові значення індексу хмарності
#define SUN_THRESHOLD 0.05f
#define CLOUD_THRESHOLD 0.25f
ГЛОБАЛЬНІ ЗМІННІ
// Значення з АЦП (12-біт)
volatile uint16_t adcRawVoltage = 0;
volatile uint16_t adcRawCurrent = 0;
// Обчислені фізичні величини
volatile float measuredVoltage = 0.0f; // Напруга, В
volatile float measuredCurrent = 0.0f; // Струм, А
volatile float measuredPower = 0.0f; // Потужність, Вт
// Масив для накопичення вибірки потужності
volatile float powerArray[SAMPLE_COUNT];

```

```

volatile uint16_t sampleIndex = 0;
// Статистичні характеристики
volatile float averagePower = 0.0f;    // Середнє значення потужності
volatile float variancePower = 0.0f;   // Дисперсія
volatile float standardDeviation = 0.0f; // Середньоквадратичне відхилення
volatile float cloudIndex = 0.0f;      // Індекс хмарності
// Прапор готовності статистичних даних
volatile bool statisticsReady = false;
// Перелік можливих станів погоди
typedef enum
{
    WEATHER_SUNNY = 0,    // Ясна погода (стабільна генерація)
    WEATHER_VARIABLE,    // Змінна хмарність
    WEATHER_CLOUDY       // Хмарна погода (велика варіація)
} WeatherState;
// Поточний визначений стан погоди
volatile WeatherState weatherState = WEATHER_SUNNY;
// ПРОТОТИПИ ФУНКЦІЙ
// Ініціалізація таймера Timer5
void Timer5_Init(void);
// Ініціалізація АЦП
void ADC_Init(void);
// Зчитування значення з вибраного каналу АЦП
uint16_t ADC_ReadChannel(uint8_t channel);
// Перетворення цифрового значення АЦП у напругу
float ConvertVoltage(uint16_t adcValue);
// Перетворення цифрового значення АЦП у струм
float ConvertCurrent(uint16_t adcValue);
// Обчислення миттєвої потужності
void CalculatePower(void);
// Збереження значення потужності у масив
void StorePowerSample(void);
// Обробка статистики (повний цикл)
void ProcessStatistics(void);
// Обчислення середнього значення
void CalculateAverage(void);
// Обчислення дисперсії
void CalculateVariance(void);
// Обчислення індексу хмарності
void CalculateCloudIndex(void);
// Визначення стану погоди
void DetermineWeatherState(void);
// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ TIMER5
void Timer5_Init(void)

```

```

{
    T5CON = 0x0000; // Скидання регістру керування
    TMR5 = 0;      // Обнулення лічильника
    // Встановлення переддільника 1:256
    T5CONbits.TCKPS = 0b111;
    // Встановлення періоду таймера
    PR5 = TIMER5_PERIOD;
    // Пріоритет переривання
    IPC5bits.T5IP = 3;
    IPC5bits.T5IS = 0;
    // Скидання прапора переривання
    IFS0bits.T5IF = 0;
    // Дозвіл переривання
    IEC0bits.T5IE = 1;
    // Увімкнення таймера
    T5CONbits.ON = 1;
}
// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ АЦП
void ADC_Init(void)
{
    // Скидання регістрів конфігурації
    AD1CON1 = 0;
    AD1CON2 = 0;
    AD1CON3 = 0;
    // Формат вихідних даних (цілі числа)
    AD1CON1bits.FORM = 0;
    // Автоматичний запуск перетворення після завершення вибірки
    AD1CON1bits.SSRC = 0b111;
    // Вибірка запускається вручну
    AD1CON1bits.ASAM = 0;
    // Використання внутрішніх опорних напруг
    AD1CON2bits.VCFG = 0;
    // Вимкнення сканування каналів
    AD1CON2bits.CSCNA = 0;
    // Переривання після кожного вимірювання
    AD1CON2bits.SMPI = 0;
    // Такт АЦП від системної частоти
    AD1CON3bits.ADRC = 0;
    // Час вибірки
    AD1CON3bits.SAMC = 16;
    // Дільник тактової частоти АЦП
    AD1CON3bits.ADCS = 10;
    // Налаштування AN0 і AN1 як аналогових входів
    AD1PCFG = 0xFFFF;
}

```

```

// Увімкнення АЦП
AD1CON1bits.ON = 1;
}
// ЗЧИТУВАННЯ КАНАЛУ АЦП
uint16_t ADC_ReadChannel(uint8_t channel)
{
// Вибір каналу АЦП
AD1CHSbits.CH0SA = channel;
// Початок вибірки
AD1CON1bits.SAMP = 1;
// Очікування завершення перетворення
while(!AD1CON1bits.DONE);
// Завершення вибірки
AD1CON1bits.SAMP = 0;
// Повернення результату
return ADC1BUF0;
}
// ПЕРЕТВОРЕННЯ ВЕЛИЧИН
// Перетворення цифрового коду АЦП у фізичну напругу
float ConvertVoltage(uint16_t adcValue)
{
float voltage;
// Перехід до напруги на вході АЦП
voltage = (adcValue * ADC_VREF) / ADC_MAX_VALUE;
// Масштабування через подільник
voltage *= VOLTAGE_DIVIDER_GAIN;
return voltage;
}
// Перетворення цифрового коду АЦП у струм
float ConvertCurrent(uint16_t adcValue)
{
float shuntVoltage;
float current;
// Напруга на шунті
shuntVoltage = (adcValue * ADC_VREF) / ADC_MAX_VALUE;
// Обчислення струму за законом Ома
current = shuntVoltage / (SHUNT_RESISTANCE *
CURRENT_AMPLIFIER_GAIN);
return current;
}
// Обчислення миттєвої потужності
void CalculatePower(void)
{
// P = U * I

```

```

    measuredPower = measuredVoltage * measuredCurrent;
}
// НАКОПИЧЕННЯ ДАНИХ
// Збереження миттєвого значення потужності у масив вибірки
void StorePowerSample(void)
{
    // Запис поточного значення потужності
    powerArray[sampleIndex] = measuredPower;
    // Перехід до наступного елемента масиву
    sampleIndex++;
    // Якщо масив заповнений — запускається обробка статистики
    if(sampleIndex >= SAMPLE_COUNT)
    {
        sampleIndex = 0;    // Перехід до початку буфера
        statisticsReady = true; // Прапор готовності даних
    }
}
// СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА
// Обчислення середнього значення потужності
void CalculateAverage(void)
{
    float sum = 0.0f;
    // Сумування всіх значень вибірки
    for(uint16_t i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++)
    {
        sum += powerArray[i];
    }
    // Середнє значення:
    //  $\bar{P} = (1/N) * \sum P_i$ 
    averagePower = sum / SAMPLE_COUNT;
}
// Обчислення дисперсії та середньоквадратичного відхилення
void CalculateVariance(void)
{
    float sumSquaredDeviation = 0.0f;
    float deviation;
    // Обчислення суми квадратів відхилень
    for(uint16_t i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++)
    {
        // Відхилення від середнього
        deviation = powerArray[i] - averagePower;
        // Накопичення квадрату відхилення
        sumSquaredDeviation += deviation * deviation;
    }
}

```

```

// Дисперсія:
//  $D = (1/N) * \sum (P_i - \bar{P})^2$ 
variancePower = sumSquaredDeviation / SAMPLE_COUNT;
// Середньоквадратичне відхилення:
//  $\sigma = \sqrt{D}$ 
standardDeviation = sqrtf(variancePower);
}
// Обчислення індексу хмарності
void CalculateCloudIndex(void)
{
// Індекс хмарності визначається як відносна варіація потужності:
//  $CI = \sigma / \bar{P}$ 
if(averagePower > 0.001f)
    cloudIndex = standardDeviation / averagePower;
else
    // У випадку дуже малої генерації (ніч/глибока хмарність)
    // приймається максимальна невизначеність
    cloudIndex = 1.0f;
}
// Класифікація стану погоди за статистичними критеріями
void DetermineWeatherState(void)
{
// Якщо генерація практично відсутня - вважаємо хмарність
if(averagePower < MIN_POWER_THRESHOLD)
{
    weatherState = WEATHER_CLOUDY;
    return;
}
// Класифікація за індексом хмарності:
// мале  $\sigma >$  стабільна генерація > ясна погода
if(cloudIndex < SUN_THRESHOLD)
    weatherState = WEATHER_SUNNY;
// середнє  $\sigma$  часткова хмарність
else if(cloudIndex < CLOUD_THRESHOLD)
    weatherState = WEATHER_VARIABLE;
// велике  $\sigma$  значні коливання хмарна погода
else
    weatherState = WEATHER_CLOUDY;
}
// Повний цикл статистичної обробки
void ProcessStatistics(void)
{
// Послідовне виконання всіх етапів аналізу
CalculateAverage();
}

```

```

CalculateVariance();
CalculateCloudIndex();
DetermineWeatherState();
// Скидання прапора після обробки
statisticsReady = false;
}
// ПРОЦЕДУРА ВИМІРЮВАННЯ
// Виконує один цикл вимірювання електричних параметрів СФП
void StartMeasurement(void)
{
    // Зчитування сирих даних з АЦП
    adcRawVoltage = ADC_ReadChannel(0);
    adcRawCurrent = ADC_ReadChannel(1);
    // Перетворення у фізичні величини
    measuredVoltage = ConvertVoltage(adcRawVoltage);
    measuredCurrent = ConvertCurrent(adcRawCurrent);
    // Обчислення миттєвої потужності
    CalculatePower();
    // Збереження значення у вибірку
    StorePowerSample();
}
// ПЕРЕРИВАННЯ TIMER5
// Обробник переривання таймера (періодичний запуск вимірювань)
void __ISR(_TIMER_5_VECTOR, IPL3SOFT) Timer5Handler(void)
{
    // Скидання прапора переривання
    IFS0bits.T5IF = 0;
    // Запуск циклу вимірювання
    StartMeasurement();
}
int main(void)
{
    // Ініціалізація периферії
    ADC_Init();
    Timer5_Init();
    // Дозвіл глобальних переривань
    __builtin_enable_interrupts();
    // Основний цикл програми
    while(1)
    {
        // Перевірка готовності статистичних даних
        if(statisticsReady)
        {
            // Виконання статистичної обробки

```

```

        ProcessStatistics();
    }
}

```

Лістинг програми реалізації алгоритму пошуку точки максимальної потужності.

```

#include <xc.h>
#include <sys/attribs.h>
volatile float U_k = 0.0f; // напруга
volatile float I_k = 0.0f; // струм
volatile float P_k = 0.0f; // потужність
volatile float U_prev = 0.0f;
volatile float P_prev = 0.0f;
// Коефіцієнт заповнення ШІМ
volatile float duty = 0.5f;
// Крок зміни
const float step = 0.005f;
// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ АЦП
void AdcInit(void)
{
    AD1CON1 = 0;
    AD1CON1bits.FORM = 0; // цілочисельний формат
    AD1CON1bits.SSRC = 0b111; // автозапуск після вибірки
    AD1CON1bits.ASAM = 1; // автоматичний запуск
    AD1CON2 = 0;
    AD1CON2bits.SMPI = 1; // 2 вимірювання (AN2, AN3)
    AD1CON3 = 0;
    AD1CON3bits.SAMC = 16; // час вибірки
    AD1CON3bits.ADCS = 10; // дільник такту
    AD1CHSbits.CH0SA = 2; // починаємо з AN2
    AD1CSSL = 0;
    AD1CSSLbits.CSSL2 = 1; // скан AN2
    AD1CSSLbits.CSSL3 = 1; // скан AN3
    AD1CON1bits.ON = 1; // увімкнути АЦП
}

//ЗЧИТУВАННЯ АЦП

void ReadADC(void)
{
    // Читання результатів з буфера
    U_k = (float)ADC1BUF0; // канал AN2
    I_k = (float)ADC1BUF1; // канал AN3
}

```

```

// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ PWM
void PWM_Init(void)
{
    // Timer2
    T2CON = 0;
    T2CONbits.TCKPS = 0;    // дільник 1:1
    PR2 = 2000;            // період PWM
    TMR2 = 0;
    T2CONbits.ON = 1;
    OC1CON = 0;
    OC1CONbits.OCM = 0b110; // PWM режим
    OC1CONbits.OCTSEL = 0; // Timer2
    OC1R = PR2 / 2;        // початково 50%
    OC1RS = PR2 / 2;
    OC1CONbits.ON = 1;
}
// ВСТАНОВЛЕННЯ PWM
void SetPWM(float d)
{
    // Обмеження діапазону
    if (d > 0.95f) d = 0.95f;
    if (d < 0.05f) d = 0.05f;
    duty = d;
    // Перерахунок у регістр
    OC1RS = (uint16_t)(duty * PR2);
}
// MPPT (Perturb & Observe)
void MPPT_PO_Update(void)
{
    // Обчислення потужності
    P_k = U_k * I_k;
    float dP = P_k - P_prev;
    float dU = U_k - U_prev;
    // Алгоритм P&O
    if (dP > 0)
    {
        if (dU > 0)
            duty += step;
        else
            duty -= step;
    }
    else if (dP < 0)
    {

```

```

    if (dU > 0)
        duty -= step;
    else
        duty += step;
}
// Оновлення PWM
SetPWM(duty);
// Збереження попередніх значень
P_prev = P_k;
U_prev = U_k;
}
// TIMER4 (10 Гц)
void Timer4_Init(void)
{
    T4CON = 0;
    T4CONbits.TCKPS = 7; // дільник
    PR4 = 62500; // 10 Гц
    TMR4 = 0;
    IPC4bits.T4IP = 5; // пріоритет
    IPC4bits.T4IS = 0;
    IFS0bits.T4IF = 0;
    IEC0bits.T4IE = 1;
    T4CONbits.ON = 1;
}
// ОБРОБНИК ПЕРЕРИВАННЯ
void __ISR(_TIMER_4_VECTOR, IPL5SOFT) Timer4Handler(void)
{
    IFS0bits.T4IF = 0; // скидання прапора
    ReadADC(); // зчитування U та I
    MRPT_PO_Update(); // виконання MRPT
}
int main(void)
{ AdcInit(); PWM_Init(); Timer4_Init();
  __builtin_enable_interrupts();// Дозвіл переривань
  while (1){}
}

```

ДОДАТОК В

Лістинг коду програми моделі СФУ

```

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    // === ВСТАНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБІРКИ =====
    // Тривалість ковзного вікна аналізу визначає часову роздільну здатність оцінки
    // хмарності.
    // Менше значення -більша чутливість до швидких змін, але більший шум.
    // Більше значення -згладжування, але втрата деталізації.
    int windowMinutes = 15;
    TimeSpan windowSize = TimeSpan.FromMinutes(windowMinutes);
    // === ЗЧИТУВАННЯ ТА ПІДГОТОВКА ДАНИХ =====
    // time — часові мітки вимірювань
    // power — миттєва потужність СФП (розраховується як добуток напруги на
    // струм)
    var time = new List<DateTime>();
    var power = new List<double>();
    OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
    if (ofd.ShowDialog() != DialogResult.OK)
        return;
    var lines = File.ReadAllLines(ofd.FileName);
    foreach (var line in lines)
    {
        // Пропуск порожніх рядків (захист від помилок формату файлу)
        if (string.IsNullOrEmpty(line))
            continue;
        // Очікуваний формат рядка: HH:mm:ss U I
        var parts = line.Split(new[] { ' ' }, StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
        // Перетворення часу до типу DateTime (без прив'язки до дати)
        DateTime t = DateTime.ParseExact(
            parts[0],
            "HH:mm:ss",
            CultureInfo.InvariantCulture);
        // Перетворення напруги та струму (з урахуванням десяткового роздільника)
        double u = double.Parse(parts[1].Replace(',', '.'), CultureInfo.InvariantCulture);
        double i = double.Parse(parts[2].Replace(',', '.'), CultureInfo.InvariantCulture);

        // Формування масивів даних
        time.Add(t);
        power.Add(u * i); // P = U * I
    }
    /= ПІДГОТОВКА ДАНИХ ДЛЯ ГРАФІКА ПОТУЖНОСТІ
    // Вісь X — час у хвилинах від початку доби

```

```

double[] x = new double[power.Count];
double[] y = power.ToArray();
for (int i = 0; i < power.Count; i++)
    x[i] = time[i].TimeOfDay.TotalMinutes;
// ===== ВІКОННА СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА =====
// Результати аналізу:
// windowCenterX - центр кожного вікна (час)
// cloudIndexY - індекс хмарності
textBox1.Clear();
var windowCenterX = new List<double>();
var cloudIndexY = new List<double>();
int startIndex = 0;
// Основний цикл кожного (неперекривного) віконного аналізу
while (startIndex < time.Count)
{
    // Початок вікна визначається поточним індексом
    DateTime windowStart = time[startIndex];
    // Кінець вікна = початок + задана тривалість
    DateTime windowEnd = windowStart + windowSize;
    var windowValues = new List<double>();
    int idx = startIndex;
    // Формування вибірки потужності в межах поточного вікна
    while (idx < time.Count && time[idx] < windowEnd)
    {
        windowValues.Add(power[idx]);
        idx++;
    }
    // Мінімальна кількість значень для статистики
    if (windowValues.Count > 1)
    {
        // ===== МАТЕМАТИЧНЕ ОЧІКУВАННЯ  $\mu$  =====
        // Характеризує середній рівень потужності у вікні
        double mean = 0.0;
        foreach (var v in windowValues)
            mean += v;
        mean /= windowValues.Count;
        // ===== ДИСПЕРСІЯ  $\sigma^2$  =====
        // Оцінює розсіювання потужності відносно середнього
        double variance = 0.0;
        foreach (var v in windowValues)
            variance += (v - mean) * (v - mean);
        variance /= windowValues.Count;
        // ===== СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНЕ ВІДХИЛЕННЯ  $\sigma$  =====
        double std = Math.Sqrt(variance);
    }
}

```

```

// ===== ІНДЕКС ХМАРНОСТІ =====
// Величина, що характеризує відносну нестабільність генерації:
//  $C = \sigma / \mu$ 
// При ясному небі сигнал майже сталий -  $\sigma$  мале  $C \approx 0$ 
// При хмарності - значні флуктуації -  $\sigma$  зростає  $C$  збільшується
double cloudiness = std / mean;
// ===== КЛАСИФІКАЦІЯ СТАНУ НЕБА =====
// Порогові значення визначені емпірично
string cloudText;
if (cloudiness <= 0.011)
    cloudText = "сонячно";
else if (cloudiness < 0.025)
    cloudText = "мінлива хмарність";
else
    cloudText = "хмарно";
// ===== ЧАСОВА ПРИВ'ЯЗКА РЕЗУЛЬТАТУ =====
// Для коректного відображення використовується центр інтервалу
double centerMinute =
    (windowStart.TimeOfDay.TotalMinutes +
     windowEnd.TimeOfDay.TotalMinutes) / 2.0;
windowCenterX.Add(centerMinute);
cloudIndexY.Add(cloudiness);
// ===== ВИВІД У ТЕКСТОВЕ ПОЛЕ =====
// Формат: час початку | центр вікна | значення індексу | інтерпретація
textBox1.AppendText(
    $"{windowStart:HH:mm:ss} | {centerMinute:F0} min | " +
    $"C = {cloudiness:F3} | {cloudText}\r\n");
}
// Перехід до наступного інтервалу (без перекриття)
startIndex = idx;
}
// ===== ПОБУДОВА ГРАФІКА ПОТУЖНОСТІ =====
formsPlotPower.Plot.Clear();
var sPower = formsPlotPower.Plot.Add.Scatter(x, y);
sPower.Label = "Power";
sPower.LineWidth = 1;
sPower.MarkerSize = 0;
formsPlotPower.Plot.Axes.AutoScale();
formsPlotPower.Plot.XLabel("Time, min");
formsPlotPower.Plot.YLabel("Power, W");
formsPlotPower.Plot.Legend.IsVisible = true;
formsPlotPower.Refresh();
// = ПОБУДОВА ГРАФІКА ІНДЕКСУ ХМАРНОСТІ =====
double[] xq = windowCenterX.ToArray();

```

```
double[] yq = cloudIndexY.ToArray();
formsPlotCloud.Plot.Clear();
var sCloud = formsPlotCloud.Plot.Add.Scatter(xq, yq);
sCloud.Label = "Cloudiness index";
sCloud.LineWidth = 1;
sCloud.MarkerSize = 0;
formsPlotCloud.Plot.Axes.AutoScale();
formsPlotCloud.Plot.XLabel("Time, min");
formsPlotCloud.Plot.YLabel("Cloudiness index");
formsPlotCloud.Plot.Legend.IsVisible = true;
formsPlotCloud.Refresh();
}
```