

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут прикладного системного аналізу

Кафедра математичних методів системного аналізу

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Оксана ТИМОЩУК

«___» _____ 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Системний аналіз і управління»

спеціальності 124 «Системний аналіз»

**на тему: «Моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних
джерел енергії»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи КА-15

Гордійчук Анастасія Олександрівна

Керівник:

Професор кафедри ММСА, д.т.н., проф.

Дмитрієва Ольга Анатоліївна

Консультант з економічного роділу:

Доцент кафедри економічної кібернетики, к. е. н., доц.

Рощина Надія Василівна

Консультант з нормоконтролю:

Доцент кафедри ММСА, к.ф.-м. н.

Статкевич Віталій Михайлович

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедри штучного інтелекту ННК ІПСА

Шахновський Аркадій Маркусович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут прикладного системного аналізу
Кафедра математичних методів системного аналізу

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 124 «Системний аналіз»

Освітньо-професійна програма «Системний аналіз і управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Оксана ТИМОЩУК

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студентці
Гордійчук Анастасії Олександрівні

1. Тема роботи «Моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії», керівник роботи Дмитрієва Ольга Анатоліївна, доктор технічних наук, професор кафедри ММСА, затверджені наказом по університету від «26» 05 2025 р. № 1759-с
2. Термін подання студентом роботи 11.06.2025
3. Вихідні дані до роботи: сучасні чисельні методи моделювання складних динамічних об'єктів з розподіленими параметрами, методи стохастичного моделювання кліматичних сценаріїв, оптимізаційні підходи до розв'язання багатокритеріальних завдань, матеріали переддипломної практики.
4. Зміст роботи: аналіз предметної області дослідження, обґрунтування обраних структур даних, порівняльний аналіз методів та моделей, що підлягають реалізації, виконання просторової дискретизації на регулярних сітках, розробка алгоритмів чисельної реалізації неявних розрахункових схем підвищеної точності, тестування розробленої програмної системи, оцінювання та візуалізація отриманих результатів.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): розрахункові схеми застосованих чисельних методів, формальний

опис просторової дискретизації на регулярних сітках, структурні схеми та UML-діаграми для опису взаємодії складових програмного комплексу, графіки температурних розподілів, презентація до захисту.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний	Рощина Н. В., доц.		

7. Дата видачі завдання: 05.02.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення літератури за темою роботи	10.02.2025-13.02.2025	Виконано
2	Аналіз актуальності задачі стосовно тематики дослідження	15.02.2025-17.02.2025	Виконано
3	Формулювання задачі дипломної роботи після теоретичного ознайомлення	10.03.2025-15.03.2025	Виконано
4	Математичне моделювання задачі	20.03.2025-31.03.2025	Виконано
5	Розробка програмного продукту	01.04.2025-14.04.2025	Виконано
6	Підготовка розділів під час переддипломної практики	14.04.2025-18.05.2025	Виконано
7	Оформлення записки та розділів в дипломній роботі відповідно до нормоконтролю	10.05.2025-18.05.2025	Виконано
8	Попередній захист дипломної роботи	06.06.2025	Виконано
9	Захист дипломної роботи	16.06.2025-20.06.2025	

Студент _____

Анастасія ГОРДІЙЧУК

Керівник роботи _____

Ольга ДМИТРИЄВА

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 168 с., 16 рис., 10 табл., 2 додатки, 24 джерел.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, РІЗНИЦЕВІ СХЕМИ, КЛІМАТИЧНІ СЦЕНАРІЇ.

Об'єктом дослідження є процеси моделювання поведінки енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії в умовах реального кліматичного впливу.

Предметом дослідження виступають обчислювальні методи для реалізації неявних розрахункових схем підвищеної точності і методи стохастичного моделювання, що використовуються для симуляції процесів генерування електроенергії у фотогальванічних модулях з урахуванням теплових, оптичних, кліматичних та економічних чинників.

Мета роботи полягає в розробці програмного комплексу для імітаційного моделювання і оптимізації роботи сонячної фотоелектричної установки з метою підвищення точності прогнозування енергетичного виробітку та ефективності конфігурації системи.

Методи дослідження базуються на застосуванні чисельних методів: стохастичного моделювання на основі методу Монте-Карло, методу прогонки для розв'язання систем лінійних рівнянь, методу Ньютона для нелінійної оптимізації, методу скінченних елементів для аналізу теплових процесів, а також методів чисельної інтеграції (Ейлера, Рунге-Кутти) для моделювання зміни енергетичних параметрів у часі. Програмна реалізація здійснена з використанням мови Python та наукових бібліотек NumPy, SciPy, Matplotlib, Numba.

Практичне значення роботи полягає у створенні адаптивного програмного продукту «solar_model», який дозволяє досліджувати динаміку роботи фотоелектричних систем, враховуючи кліматичні сценарії, геометричну конфігурацію та технічні обмеження. Система може бути

застосована для енергетичного планування, техніко-економічного аналізу проєктів, формування рекомендацій щодо оптимального встановлення панелей, а також інтеграції в навчальні процеси.

ABSTRACT

Thesis: 168 pages, 16 figures, 10 tables, 2 appendices, 24 references.

MATHEMATICAL MODELING, ENERGY SYSTEM, RENEWABLE ENERGY SOURCES, DIFFERENTIAL SCHEMES, CLIMATE SCENARIOS.

The object of the research is the processes of modeling the behavior of energy systems based on renewable energy sources under real climatic conditions.

The subject of the research is computational methods for implementing implicit calculation schemes of increased accuracy and stochastic modeling methods used to simulate the processes of electricity generation in photovoltaic modules, taking into account thermal, optical, climatic and economic factors.

The aim of the thesis is to develop a software package for simulation-based modeling and optimization of a solar photovoltaic installation, with the goal of improving the accuracy of energy output prediction and the efficiency of system configuration.

The research methods are based on modeling numerical methods: stochastic modeling based on the Monte Carlo method, the run-in method for solving system linear levels, the Newton method for nonlinear optimization, the finite element method also for the analysis of thermal processes, and numerical integration methods (Euler, Runge-Kutta) for modeling changes in energy parameters over time. The software implementation was carried out using the Python language and the scientific libraries NumPy, SciPy, Matplotlib, Numba.

The practical significance of the work lies in the development of the adaptive software product *solar_model*, which enables the study of photovoltaic system dynamics while considering climatic scenarios, geometric configuration, and technical constraints. The system can be used for energy planning, techno-economic analysis of projects, generating recommendations for optimal panel orientation, and integration into educational processes for renewable energy system modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ОГЛЯД	
ЛІТЕРАТУРИ.....	13
1.1. Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та світі.....	13
1.2. Гібридні енергетичні системи: класифікація, архітектури, технічні особливості.....	21
1.3. Чисельні методи, що застосовуються у моделюванні ВДЕ-систем.....	37
1.4. Аналіз існуючих програмних рішень для симуляції та оптимізації ВДЕ-комплексів.....	41
1.5. Висновки до розділу 1.....	66
2. МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	62
2.1. Фізичні основи фотогальванічного перетворення.....	68
2.2. Кліматичні та астрономічні передумови розрахунку інсоляції.....	69
2.3. Математичні моделі системи.....	71
2.4. Чисельні методи, реалізовані у програмі.....	73
2.5. Архітектура програмного комплексу.....	75
2.6. Висновки до розділу 2.....	84
3. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	87
3.1. Підготовка середовища розробки.....	87
3.2. Робочий процес моделювання.....	88
3.3. Експериментальні результати.....	93
3.4. Висновки до розділу 3.....	103
4 ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ	104
4.1 Постановка задачі проектування	105
4.2 Обґрунтування функцій програмного продукту.....	107

4.3 Обґрунтування системи параметрів програмного продукту.....	111
4.4 Аналіз експертного оцінювання параметрів.....	117
4.5 Аналіз рівня якості варіантів реалізації функцій.....	121
4.6 Економічний аналіз варіантів розробки ПП.....	124
4.7 Вибір кращого варіанту ПП техніко-економічного рівня.....	127
4.8. Висновки до розділу 4.....	129
ВИСНОВКИ.....	131
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	137
ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ.....	140
ДОДАТОК Б. ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	160

ВСТУП

Стрімке зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) — сонячної, вітрової, біомасової та геотермальної — зумовлено водночас глобальними кліматичними зобов'язаннями й прагненням держав підвищити власну енергетичну безпеку. Для України ця потреба набула особливої гостроти внаслідок російської воєнної агресії, ракетних ударів по критичній інфраструктурі та різкого здорожчання викопних палив. Відновлювані технології, інтегровані в локальні та регіональні енергосистеми, розглядаються як ключова передумова декарбонізації та зменшення залежності від імпорتنих ресурсів. Однак висока стохастичність сонячного та вітрового потенціалів, обмеженість акумулювальних потужностей і складність оперативного диспетчерського керування створюють суттєві виклики для їх ефективної експлуатації.

У відповідь на зазначені виклики сучасна наукова спільнота приділяє значну увагу математичному моделюванню й оптимізації гібридних енергетичних систем (ГЕС) на основі ВДЕ. Саме обчислювальний експеримент дозволяє всебічно проаналізувати нелінійні фізичні процеси, що відбуваються в таких системах, оцінити вплив мінливих кліматичних факторів, підібрати раціональні конфігурації обладнання й розробити стратегії керування, спрямовані на мінімізацію втрат та підвищення енергоефективності. З огляду на це тема дипломного дослідження — «Моделювання та оптимізація енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії з використанням чисельних методів» — є науково й практично актуальною.

Метою роботи є розроблення та верифікація математичної моделі гібридної енергетичної системи, що поєднує сонячні та вітрові установки з накопичувачами електро- й теплової енергії, а також її подальша багатокритеріальна оптимізація за допомогою сучасних чисельних методів.

Об'єктом дослідження виступають фізичні процеси перетворення, накопичення й розподілу енергії у ВДЕ-комплексах.

Предметом — методи математичного опису цих процесів і алгоритми обчислювальної оптимізації параметрів системи.

Завдання дослідження передбачають:

1. Провести аналітичний огляд останніх підходів до моделювання енергетичних систем на базі ВДЕ, визначити їх переваги та обмеження.
2. Сформулювати детерміновану математичну модель потоків маси й енергії у сонячних та вітрових установках з урахуванням теплових втрат, геометричних характеристик і динаміки навантажень.
3. Реалізувати чисельне розв'язання моделі:
 - дискретизувати рівняння теплопровідності й електромагнітного балансу методом скінченних різниць та скінченних елементів;
 - інтегрувати систему диференціальних рівнянь Рунге-Кутти четвертого порядку;
 - застосувати явні й неявні схеми стабілізації для жорстких задач.
4. Забезпечити алгоритмічну оптимізацію конфігурації ГЕС (потужність модулів, кут нахилу панелей, місце розташування вітротурбін, розмір акумулювальних ємностей) за допомогою стохастичних методів (генетичні алгоритми, диференційна еволюція) з урахуванням мінливих погодних сценаріїв.
5. Провести серію чисельних експериментів для типових кліматичних умов України, оцінити вплив добових та сезонних коливань інсоляції й швидкості вітру на виробіток енергії, сформулювати рекомендації щодо підвищення техніко-економічної ефективності системи.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції декількох чисельних підходів у єдину багаторівневу модель, що вперше враховує широкий спектр фізичних процесів — від мікроскопічних теплових явищ у фотомодулі до макроскопічної диспетчеризації енергопотоків — та дозволяє оптимізувати систему за умов багатфакторної невизначеності навколишнього середовища.

Вперше для вітчизняних ґрунтово-кліматичних регіонів буде запропоновано адаптивний алгоритм налагодження параметрів ГЕС у реальному часі.

Практична значущість полягає в можливості безпосереднього використання отриманих результатів при проектуванні промислових та муніципальних ВДЕ-кластерів, що забезпечить:

- підвищення коефіцієнта корисного використання встановленої потужності на 8–12 %;
- скорочення питомих рівнів втрат електроенергії до 15 %;
- зниження викидів CO₂ на 25–30 % у порівнянні з традиційними схемами енергопостачання такої ж потужності.

Методи дослідження. Теоретичну основу становлять рівняння енергобалансу, термодинаміки та аеродинаміки. Для їх чисельної реалізації використовуються:

- метод скінченних різниць і метод Кранка-Ніколсона для розв’язання нестационарних теплових задач;
- метод скінченних елементів у пакеті *Comsol Multiphysics* для моделювання складної геометрії панельних полів;
- високоточні схеми Рунге-Кутти для інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь;
- генетичні алгоритми та диференційна еволюція для глобальної оптимізації багатовимірних функціоналів.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі узагальнено світовий і вітчизняний досвід інтеграції ВДЕ та описано теоретичні основи чисельного моделювання. У другому розділі подано постановку задачі, побудову математичної моделі й деталі обчислювальних алгоритмів. Третій розділ присвячено оптимізації параметрів системи, аналізу результатів чисельних експериментів і формулюванню практичних рекомендацій. Висновки підбивають підсумки виконаного дослідження та окреслюють напрями подальшої роботи.

Таким чином, заплановане дослідження спрямоване на розв’язання актуального для української енергетики завдання — підвищення ефективності та надійності енергопостачання на основі відновлюваних джерел шляхом застосування сучасних чисельних методів моделювання й оптимізації. Отримані результати становитимуть науково-методичний доробок, що може бути використаний у навчальному процесі, в інженерній практиці та у сфері стратегічного планування енергетичного розвитку.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та світі

На початку 2020-х рр. відзначається безпрецедентне зростання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У 2022 р. їхня частка у глобальній електрогенерації сягнула $\approx 30\%$, а у 2023 р. введено майже 510 ГВт нових потужностей (що на 50% більше, ніж у 2022). COP28 у Дубаї підтвердив мету потроїти світову потужність ВДЕ до 2030 р. (з $\approx 4\,210$ ГВт у 2023 р. до $\approx 11\,000$ ГВт). Зростання ВДЕ у 2023 р. відбулося переважно за рахунок сонця ($\approx 75\%$ нових потужностей) і вітру, причому найбільший внесок зробила Азія (понад 69% приросту, передусім Китай). Загалом за оцінками МЕА до 2028 р. сукупна потужність ВДЕ може зрости до $\approx 7\,300$ ГВт. Важливе значення має також падіння вартості технологій – у 2023 р. 81% великих проєктів з ВДЕ було дешевшим за аналогічні з викопних джерел [1].

В Україні ріст відновлюваної енергетики до 2022 р. був також помітним: до вступу в дію загальна потужність ВДЕ сягнула $\approx 9,9$ ГВт, з них ≈ 6 ГВт – сонячних станцій, 2 ГВт – вітрових, решта – біо- та малі гідроелектростанції. У 2021 р. ВДЕ дали 12,8 ТВт·год ($\approx 8,1\%$ від загальної генерації). Від початку війни сектор зазнав втрат, але залишається в пріоритеті політики: у 2023 р. частка ВДЕ в електропостачанні України (з урахуванням великих ГЕС) становила $\approx 22\%$. Попри складні обставини, саме ВДЕ розглядаються як ключ до енергетичної незалежності країни. За десятиріччя до війни у «зелену» енергетику вкладено понад \$12 млрд, а підтримка з боку держави та іноземних партнерів надалі стимулюватиме розвиток цього сегмента [6].

Сонячна енергія - найдинамічніший сегмент ВДЕ: на кінець 2022 р. сумарна потужність сонячних (фотовольтаїчних) станцій світу становила ≈ 1185 ГВт, з яких майже 243 ГВт введено лише у 2022 р. (ріст $\approx 37\%$ до 2021). У 2023 р. ще $\approx 75\%$ нових ВДЕ-потужностей було пов'язано саме з сонцем.

Технології СЕС активно здешевлюються – наприклад, середня собівартість електроенергії з нових сонячних проєктів у 2023 р. впала на $\sim 12\%$ порівняно з попереднім роком. В Україні сонячний сектор має високий потенціал: інсоляція ($1100\text{--}1500\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) вища, ніж у багатьох європейських країнах. До 2022 р. у країні налічувалося ≈ 1400 сонячних електростанцій різних масштабів, потужністю близько 6 ГВт. Станом на початок 2024 р. вони виробляють $\approx 75\%$ «зеленої» електроенергії України (без урахування великих ГЕС). Особлива увага приділяється розвитку як великих СЕС, так і малих домашніх сонячних систем, які дають гнучкість у мережевих навантаженнях.

Вітрова енергія - друга за обсягом технологія ВДЕ у світі: на кінець 2022 р. сумарна потужність вітроелектростанцій сягнула ≈ 906 ГВт. У 2022 р. світова додаткова наземна та морська вітрова потужність становила ≈ 77 ГВт. Лідером залишається наземний вітер (близько 90% потужностей) із значним внеском Китаю (понад 47% приросту в 2022). Морські вітрові ферми швидко розвиваються у Європі, США, Китаї – в тому числі плаваючі установки. В Україні до 2022 р. було встановлено ≈ 2 ГВт вітрових потужностей (34 станції з 699 турбінами), головним чином на північному сході країни (середня швидкість ≈ 7 м/с). У 2023 р. введено одну з найбільших вітропарків – «Тилігуль» (78 МВт). Втім, $\approx 80\%$ українських вітропотужностей опинилися під окупацією або пошкоджені, що створює завдання з їхнього відновлення та подальшого розгортання нових ВЕС (включно з потенційним офшором на Чорному морі) [16].

Біоенергетика - включає переробку твердої біомаси, біогазу, біопалив та відходів у електро- і теплопостачання. На світовому рівні біоенергетика забезпечує близько 9% генерації електроенергії ($\approx 685\text{ ТВт}\cdot\text{год}$) і понад 90% усієї відновлюваної теплової енергії. Біопаливо покриває $\approx 3,6\%$ світового паливного ринку у транспорті. Цей сегмент цінують за можливість переробки агровідходів і сталого вуглецевого циклу. В Україні є значний ресурс для біоенергетики: щороку агропромисловий комплекс генерує десятки мільйонів тонн соломи та залишків (≈ 34 млн т зернових відходів). Структура галузі –

переважно тверда біомаса ($\approx 70\%$), біогаз ($\approx 15\%$) і біодизель/біоетанол ($\approx 15\%$). Наразі в Україні встановлено дуже мало біоенергетичних потужностей ($\approx 0,2$ ГВт), але уряд працює над заохоченням їх розвитку (низькі витрати на сировину, додатковий дохід для села).

Гідроенергія - найбільше джерело ВДЕ глобально. За даними ІНА, загальна світова потужність гідроелектричних станцій до кінця 2023 р. становила $\approx 1\,412$ ГВт. ГЕС забезпечують більшу частину оновлюваної генерації (за деякими оцінками – понад 50% усіх ВДЕ) і слугують головним механізмом накопичення енергії (понад 90% світового обсягу «запасеної» електроенергії забезпечують гідроакумулятори). Масштаб нового будівництва великих ГЕС обмежений екологічними, соціальними та економічними факторами, тож подальше зростання спостерігається переважно в Азії, Африці та Латинській Америці, де плануються проєкти високої потужності. В Україні гідросектор має важливе значення для балансування мережі. До 2022 р. експлуатувалося 10 великих ГЕС (сукупно ≈ 6 ГВт потужності) та 3 гідроакумулюючі станції. Малих ГЕС налічувалося ≈ 50 (загалом виробляючи $\approx 0,2$ млрд кВт·год щорічно). Нині гідроенергетика України зазнала значних втрат через війну: знищено Каховську ГЕС та пошкоджено інші, внаслідок чого майже 2,5 ГВт гідропотужностей виведено з ладу. Одним із пріоритетів є реставрація та модернізація існуючих ГЕС і, в перспективі, проєктування нових малих і великих об'єктів після відновлення миру [2].

Геотермальна енергія - суттєво менша за обсягом у порівнянні з іншими ВДЕ. Світова встановлена геотермальна потужність (електрогенерація) — лише $\approx 16\text{--}17$ ГВт (кінець 2023 р.). Основні виробники – США, Індонезія, Філіппіни, Туреччина, Нова Зеландія. Геотермальна генерація зростає повільно, переважно за рахунок вищої температури свердловин і нових турбін. В Україні геотермальні ресурси майже не використовуються у генерації; однак у західних регіонах (Карпати) і на півдні (Крим) є поклади гарячих підземних вод, які в перспективі можна застосувати для опалення та

теплових насосів. Розробки в області глибокої геотермії в Україні поки що відсутні [3].

У 2022 р. відновлювані джерела виробили понад 8 500 ТВт·год електроенергії ($\approx 30\%$ світового обсягу). Загальна встановлена потужність ВДЕ у 2023 р. перевищила 4 200 ГВт. З них гідро – $\approx 1\,412$ ГВт, сонячні – $\approx 1\,185$ ГВт, вітрові – ≈ 906 ГВт, геотермальні – ≈ 16 ГВт. Біоенергетика (електростанції на біомасі/біогазі) становить кілька сотень ГВт. У 2022 р. приріст потужностей ВДЕ складав ≈ 470 ГВт (≈ 243 ГВт PV, 77 ГВт ветро, 22 ГВт гідро). У 2023 р. додано рекордні ≈ 510 ГВт ($\approx 75\%$ – PV). Сумарні інвестиції у «чисту» енергетику у світі в 2023 р. досягли $\approx \$1,77$ трлн, зростивши вклади в сонце, вітер, водень і електромобілі (Китай у 2023 р. інвестував $\approx \$676$ млрд, 38% світових коштів).

Станом на кінець 2021 р. загальна встановлена потужність ВДЕ в Україні становила $\approx 9,66$ ГВт (з урахуванням домогосподарських СЕС), з яких ≈ 2 ГВт – вітру, 6 ГВт – сонця, 0,2 ГВт – біо. У 2021 р. вони дали 12,8 ТВт·год ($8,1\%$ генерації). До початку 2024 р. через війну ці показники знизилися – загальна потужність склала $\approx 8,7$ ГВт. У 2023 р. додано близько 182 МВт нових ВЕС і ≈ 500 МВт СЕС. Велика частина електроенергії України наразі надходить з ГЕС/ГАЕС, атомних і теплових станцій, але частка ВДЕ зростає: у 2023 р. вона склала $\approx 22\%$ (включно з великими ГЕС). За останні роки держава також підготувала нормативну базу для статистики ВДЕ – запроваджено реєстри, прозорі аукціони, моніторинг генерації «зеленої» електроенергії тощо [11].

Сучасні технології ВДЕ стають дедалі ефективнішими. По сонцю розвиваються багат шарові напівпровідники (перовськіти), біфасіальні модулі, інструменти машинного навчання для оптимізації панелей. У вітряному секторі застосовують турбіни підвищеної потужності (8–15+ МВт), плавучі платформи для морських ВЕС, аеродинамічні обтічники та LiDAR-датчики для точнішої генерації. Біоенергетика поступово впроваджує нові методи (біогазові реактори, газифікацію відходів, передові біопалива).

Особливою увагою є системи зберігання енергії та інтеграція ВДЕ в мережу. У 2024–25 роках основний наголос – на акумуляторах (літій-іонних, натрієвих, твердотільних) та гідроакумуляторах. Зокрема, літій-іонні батареї залишаються найпоширенішим способом зберігання, їх вартість впала завдяки масштабному виробництву. Розгортаються також технології Power-to-X (утворення водню через електроліз, з наступним використанням у паливних елементах або «синтетичних» паливних системах) для балансування надлишків «зеленого» струму. Окрім цього, розвиваються розумні мережі (smart grids) з автоматизованим управлінням і двостороннім зв'язком між генерацією та споживачем, а також системи розподіленої генерації й побудови мікромереж (особливо в критичних об'єктах) [13].

Головні рішення – літій-іонні батареї та гідроакумулятори; Li-ion наразі домінують у великоформатному зберіганні. Паралельно досліджують флоумережеві (в тому числі ванадієві) та водневі накопичувачі. Удосконалюються системи моніторингу і прогнозування генерації, інвертори з підтримкою стабільності мережі, нові підходи до балансування попиту і пропозиції (імплементация технологій demand response, vehicle-to-grid тощо). Крім традиційних кремнієвих модулів, розвиваються перовськітні та органічні фотоелементи, двосторонні («біфасіальні») панелі, що отримують додаткове випромінювання з поверхні, а також сонячні концентратори. Впроваджуються багатомегаватні наземні турбіни (8–15 МВт), а також плаваючі вітрові установки для глибоководних морів. Використовуються аеродинамічні оптимізації лопатей і системи активного управління (Pitch, Active Flow Control). Акцент на комплексну утилізацію біоресурсів (відходів АПК, лісового сектору, органічного сміття) з отриманням біогазу/метану (для комерційних та побутових станцій) та твердого біопалива (пелети, брикети). Також розробляються дрібнорозмірні когенераційні установки для опалення селищ [5].

Удосконалення політик у сфері ВДЕ відбувається на міжнародному рівні через угоди та державні програми. Після Паризької угоди та останніх

самітів (COP26–28) багато країн оголосили амбітні цілі: наприклад, ЄС узгодив підвищити частку ВДЕ у загальному енергоспоживанні до 42,5% до 2030 р. (з потенційним підйомом до 45%). Китай включив у свій 14-й п'ятирічний план мету – 33% електроенергії з ВДЕ до 2025 р. США у 2022 р. ухвалили закон IRA, що розширює податкові кредити та стимули для сонця, вітру та зберігання. Разом з тим реалізуються міжнародні фінансові механізми: фонди та партнерства (хаб «Just Energy Transition», кліматичні фонди) інвестують у декарбонізацію енергосистем країни з вугільною залежністю. Загалом світові інвестиції у «чисту» енергетику зростають (у 2023 р. – рекордні $\approx \$1,77$ трлн), але МЕА вказує на проблему недостатнього фінансування в бідніших країнах (низький приплив капіталу – «ключове питання» для цієї категорії) [4].

Головні державні документи задають курс на відновлювану енергетику. Національний план з енергетики та клімату (НПЕК) заклав цілі «зеленого» переходу, у тому числі нову мету: забезпечити 50% генерації з ВДЕ і 50% з АЕС до 2035 р.. Прийнято закони і постанови щодо «зеленого» тарифу, пріоритетного приєднання ВДЕ, роботи аукціонів та торгівлі «зеленими» сертифікатами. У 2024 р. «зелений» тариф для сонячної енергії становить 0,117 €/кВт·год. Залучено низку програм підтримки: поєднуються державні інвестиції, кредитні гарантії (ЄБРР, GCF), «зелена» митна пільга, податкові преференції для місцевих виробників обладнання. До війни в сектор ВДЕ вже вкладено $> \$12$ млрд, у 2023 р. тільки інвестиції в сонячні проекти сягнули $\approx \$150$ млн. Одночасно потрібні заходи зі стимулювання відновлення «зелених» активів (ремонт ВЕС/СЕС після руйнувань), а також розвиток інфраструктури для ВДЕ (розвиток мереж, електромережних сервісів, енергозберігаючих технологій). Важливим кроком є інтеграція українського енергоринку з європейським (підписано багато нормативів ЄС у сфері ВДЕ), що відкриває доступ до кредитів і до спільних торговельних механізмів [11].

Зростаюча частка сонця і вітру ускладнює стабільність енергосистем. При надлишковій генерації необхідно «вирубувати» частину відновлюваної

енергії (curtailment). Так, у 2022 р. у Німеччині було втрачено $\approx 5,4$ ТВт·год вітру через перевиробництво. Це свідчить про потребу в потужних системах зберігання та гнучких балансувальних рішеннях (наприклад, акумулятори, модернізація ГАЕС, управління попитом). Недостатність таких систем є гальмом для подальшого розгортання ВДЕ в умовах пікових навантажень.

Важливою проблемою залишається надійне фінансування ВДЕ-проектів і стабільність підтримки. МЕА відзначає, що для багатьох країн з обмеженим капіталом «недостатність фінансування» стала «ключовим питанням» у масштабуванні ВДЕ. Крім того, зміни законодавства чи економічні кризи можуть знижувати привабливість галузі (зміни «зеленого» тарифу, затримки аукціонів, залежність від імпортованих комплектуючих). В Україні, наприклад, накопичувалися заборгованості перед виробниками ВДЕ (через ринкову реформу), що свого часу стримувало розвиток. У цілому необхідно забезпечити прозорі правила, довгострокову підтримку (забезпечити повернення інвестицій) і доступ до міжнародних фінансових ринків [8].

Повномасштабна війна Росії проти України продемонструвала вразливість енергосистеми. За даними МЕА, за 2022–2023 рр. близько половини генеруючих потужностей України було пошкоджено або окуповано; лише навесні 2024 р. додатково втрачено ≈ 9 ГВт (переважно теплових і гідроелектростанцій). Удар по гідроінфраструктурі зруйнував Каховську ГЕС та вивів з ладу інші ГЕС ($\approx 45\%$ гідропотужностей, близько 2,5 ГВт). Це підкреслює необхідність робити ВДЕ-модулі більш розосередженими (малими, децентралізованими) та захищеними, а також швидко відновлювати пошкоджене обладнання. Наведені обставини вимагають відновлення мереж і будівництва резервних систем накопичення на територіях, що постраждали.

Інколи ВДЕ-проекти зустрічають місцевий опір (суперечки за землі, видовище від турбін, вплив гідробудівництва на екосистеми). Розвиток біоенергетики піднімає питання конкуренції ресурсів – зокрема, використання сільськогосподарської біомаси може конкурувати з продовольчим

виробництвом або екологією. Також бракує кваліфікованих кадрів і виробничих потужностей для локального виробництва ВДЕ-обладнання. Ці фактори треба враховувати та пом'якшувати шляхом соціальних програм, екологічних оцінок впливу та розвитку вітчизняної індустрії «зелених» технологій [9].

Перспективи відновлюваної енергетики оцінюються дуже оптимістично. За базовим прогнозом ІЕА, ВДЕ залишаються найшвидше зростаючим сектором електроенергетики: до середини 2020-х рр. відновлювані джерела мають випередити вугілля за обсягом генерації. За прогнозами, до 2030 р. світові потужності ВДЕ можуть збільшитися у 2–3 рази, якщо реалізувати заходи, погоджені на COP28 (ціль потроїти потужності). Подальше здешевлення технологій (як свідчать дані IRENA, у 2023 р. три чверті нових проектів було дешевшим за аналоги на вугіллі/газі) ще більше підтримає їхнє поширення. Очікується активний розвиток гібридних систем (наприклад, сонце/вітер + накопичувачі), масштабування зеленого водню (Power-to-X) і міжсекторного сполучення (транспорт, будівлі). Зростуть інвестиції у транспортну електрифікацію й зарядну інфраструктуру, що стимулюватиме попит на «чисту» електроенергію.

В Україні відновлювана енергетика має стати основою відбудови та модернізації енергосистеми. Затверджені цілі – 50% ВДЕ до 2035 р. і вуглецева нейтральність до 2060 р. (порівняно з 1990) – задають довгострокову стратегію. За умови здобуття миру знищені ТЕС і ГЕС мають бути заміщені новими ВДЕ-генераторами (сонячними та вітровими електростанціями, біо- і гідро комплексами). Реконструкційні та інфраструктурні програми передбачають фінансування сонячних парків у південних регіонах, вітроферм на руїнах старих гідро, розвиток біоенергетики у сільській місцевості. Міжнародна підтримка (прямі гранти, зелені кредити, програми USAID, Німеччина тощо) робить галузь привабливою для інвесторів [22].

Таким чином, наближення світового енергетичного майбутнього до ВДЕ залишається незаперечним трендом. За наявності належних політик та інвестицій «зелена» енергетика матиме найбільшу питому вагу у виробництві електроенергії – вже близько 2025 р. вона може випередити вугілля. Для України ж стратегічним завданням є використання цієї можливості у процесі відновлення країни та побудові стійкої, енергонезалежної економіки на основі відновлюваних ресурсів.

1.2. Гібридні енергетичні системи: класифікація, архітектури, технічні особливості

Гібридна енергетична система (ГЕС) – це енергетичний комплекс, який одночасно використовує декілька різномірних джерел енергії або технологій генерації електроенергії для спільного електропостачання споживачів. Іншими словами, ГЕС – це комплекс обладнання, що поєднує різні джерела енергії з метою забезпечення безперебійного електропостачання споживачів. Як правило, до складу гібридної системи входять відновлювані джерела енергії (наприклад, сонячні фотопанелі, вітрові турбіни, біоенергетичні установки тощо) у комбінації з традиційними (паливними) генераторами або/та системами зберігання енергії (акумуляторні батареї, накопичувачі тепла, водневі системи тощо). Така інтеграція різномірних джерел дозволяє взаємно доповнювати їх переваги і компенсувати недоліки, підвищуючи надійність енергопостачання та якість електроенергії [8].

Гібридні енергосистеми зазвичай проєктуються з метою підвищення стійкості енергопостачання та ефективності використання енергоресурсів. За рахунок оптимального балансування різних генеруючих потужностей такі системи характеризуються підвищеною стабільністю роботи і кращими економічними показниками порівняно з одноджерельними установками. Комбінування декількох джерел дає змогу покращити паливну економічність і знизити витрати – зокрема, додавання накопичувачів енергії дозволяє більш

ефективно використовувати відновлювану енергію і зменшити витрати палива на резервних генераторах. Таким чином, гібридні системи покликані забезпечити гнучке, ефективне та надійне енергопостачання, особливо в умовах коливань навантаження або нестабільності окремих джерел енергії.

Гібридні енергосистеми дуже різноманітні за складом і конфігурацією. Їх можна класифікувати за кількома ознаками: за видами джерел енергії, за схемою з'єднання компонентів, а також за масштабом та призначенням системи. Кожна з цих класифікацій відображає різні аспекти побудови ГЕС [18].

За типом джерел, що комбінуються, вирізняють різні типи гібридних установок. Поширеними є гібридні відновлювані системи, які поєднують дві або більше ВДЕ (відновлюваних джерел енергії) для підвищення стабільності генерації. Класичні приклади – *сонячно-вітрові системи, сонячно-гідроенергетичні, вітро-гідроенергетичні* комплекси тощо. Комбінація сонячних батарей і вітротурбін дозволяє вирівнювати виробництво електроенергії: у сонячні дні більшу частку генерації дає фотопанель, тоді як у вітряні або хмарні – вітротурбіна, що забезпечує більш стабільне сумарне виробництво енергії. Подібно, сполучення сонячних і біомасових установок чи інших ВДЕ підвищує загальний ККД та надійність, оскільки енергія різних джерел надходить у різний час і з різною передбачуваністю [6].

Окрім відновлюваних джерел, гібридні системи можуть включати й традиційні (невідновлювані) джерела. Наприклад, часто застосовуються *сонячно-дизельні ГЕС* – фотоелектрична станція у парі з дизель-генераторною установкою. В такій системі вдень основну енергію дає сонячна станція, а дизельний двигун може автоматично запускатися вночі або при недостатній сонячній генерації, забезпечуючи безперервність живлення. Аналогічно, можливі комбінації *вітро-дизельних, біогазових установок з газовими генераторами* тощо. Поєднання викопного палива з ВДЕ дозволяє суттєво економити пальне і в той же час гарантувати енергопостачання за будь-яких

умов. Окремий клас – ядерно-відновлювальні гібридні системи, де, приміром, атомний реактор працює разом з полем сонячних чи вітрових електростанцій в єдиній системі. Дослідження відзначають, що ядерно-відновлювальні ГЕС можуть підвищувати маневреність енергосистеми та ефективність використання реакторів за рахунок спільної оптимізації режимів роботи двох різних джерел енергії.

За типом топології або електричного з'єднання компонентів гібридні системи умовно поділяють на послідовні, паралельні та комбіновані (послідовно-паралельні). Така класифікація відображає, як саме різні джерела і накопичувачі під'єднані між собою та до споживачів [9].

Послідовна схема (серійна ГЕС): усі джерела енергії під'єднані послідовно через єдиний ланцюг перетворення енергії до навантаження. Практично це часто реалізується як єдина шина постійного струму: різні генератори (сонячні панелі, віротурбіни через випрямлячі, тощо) подають вироблену енергію на спільну DC-шину, з якої через один інвертор живиться зміннострумове навантаження. Таким чином, всі джерела як би “стікаються” в один потік енергії. Наприклад, дизель-генератор може працювати лише на заряд акумуляторної батареї, а вже від батареї через інвертор живиться електромережа об'єкта – такий підхід відповідає серійній архітектурі. Перевага послідовних схем – спрощення координації джерел (єдина точка керування потоком енергії), проте за такої схеми додаткова ланка перетворення може знижувати загальний ККД [12].

Паралельна схема: джерела енергії підключені паралельно до загальної шини змінного струму (або до кількох шин), живлячи споживачів незалежно і одночасно. В паралельній архітектурі кожне джерело має власний перетворювач (інвертор або контролер), синхронізований між собою, і подає електроенергію прямо в спільну внутрішню мережу. Наприклад, віротурбіна через свій інвертор та масив сонячних панелей через свій інвертор разом працюють на загальну AC-шину, до якої під'єднані навантаження. При цьому кожне джерело може частково або повністю покривати навантаження, а їх

сумарна генерація розподіляється автоматично. Паралельні ГЕС дозволяють безпосередньо додавати чи відключати модулі генерації, забезпечуючи гнучкість, але вимагають складніших систем керування для синхронізації джерел.

Комбінована (послідовно-паралельна) схема: поєднує елементи обох підходів. Частина підсистем може бути об'єднана на спільній DC-шині, тоді як інші джерела підключені до AC-шини, і між ними встановлені двонапрямні перетворювачі. Такі гібридні AC/DC системи дозволяють інтегрувати одночасно і постійнострумові, і зміннострумові джерела. Наприклад, сонячні панелі та батарея можуть працювати на DC-шину, зв'язану через інвертор із локальною AC-мережею, до якої паралельно під'єднано також дизель-генератор і навантаження. Комбінована архітектура підвищує загальну гнучкість ГЕС, дозволяючи ефективно розподіляти потоки енергії між різними сегментами системи залежно від умов. Вона застосовується у складних мікромережах, де є потреба інтеграції різних типів джерел і навантажень [16].

За потужністю та сферою застосування гібридні енергетичні системи охоплюють широкий діапазон – від невеликих домашніх установок до промислових електростанцій. Основні категорії за масштабом такі:

Домашні (приватні) ГЕС: невеликі гібридні системи потужністю зазвичай до кількох десятків кіловат, що обслуговують окремий будинок чи ферму. Найчастіше це комбіновані сонячні електростанції з акумуляторним блоком і, за необхідності, з резервним генератором (дизель/бензин). Вони призначені для забезпечення енергетичної автономності домогосподарства, економії на рахунках за електроенергію та резервного живлення при збоях мережі. Такі системи набули популярності в сільській місцевості та серед споживачів, що прагнуть енергонезалежності [18].

Комерційні (проміжного масштабу) гібридні системи: установки для живлення окремих комерційних об'єктів, установ, фермерських господарств, малого бізнесу. Їх потужність може сягати сотень кіловат. Компонування

часто включає сонячні або вітрові електростанції, зв'язані з накопичувачами енергії, і резервні ДЕС (дизель-електростанції). Ці системи забезпечують безперервну роботу критично важливих навантажень (наприклад, в лікарнях, телекомунікаційних вишках, виробництвах) і зменшують споживання дорогого пального завдяки ВДЕ.

Промислові та муніципальні ГЕС: великі гібридні електростанції або енергокомплекси, потужністю від одиниць до сотень мегават, які можуть забезпечувати електроенергією промислові підприємства, малі міста, комунальні господарства. До цієї категорії належать, наприклад, *гібридні електростанції на базі сонячних і вітрових парків* із загальною системою управління та загальною точкою приєднання до мережі. У таких системах часто застосовуються масштабні накопичувачі енергії (батареїні ферми, накопичувачі на стисненому повітрі чи водні акумулятори) для вирівнювання графіка видачі потужності. Промислові гібридні станції дозволяють генерувати більш прогнозовану та якісну електроенергію, зменшуючи навантаження на зовнішню мережу [10].

Автономні мікромережі: особлива категорія – *ізолювані гібридні системи* у форматі локальних мікромереж. Автономна мікромережа – це невелика енергосистема, що може працювати незалежно від централізованої електромережі, забезпечуючи електропостачання певної території або об'єкта (наприклад, віддаленого селища, острова, гірського притулку, військової бази тощо). Як правило, автономні ГЕС-мікромережі комбінують поновлювані джерела (сонячні панелі, вітряки, малі ГЕС), один чи кілька дизель-генераторів для резерву, а також суттєву ємність накопичувачів, щоб гарантувати енерго забезпечення 24/7. Мікромережі можуть працювати повністю ізолювано або ж мати можливість підключення до великої мережі (режим *on/off-grid*), переходячи в автономний режим при збоях зовнішньої мережі. Згідно з сучасною класифікацією, за статусом приєднання до магістральної мережі розрізняють он-грид (мережеві) ГЕС, оф-грид (поза мережею) та мікромережі – останні можуть функціонувати як в під'єднаному,

так і в ізолюваному режимах. В автономних гібридних мікромережах закладено підвищену *резилентність* (стійкість до збоїв): у разі відключення зовнішньої мережі вони здатні підтримувати локальне енергопостачання завдяки внутрішнім джерелам та накопичувачам. Це особливо важливо для критичних об'єктів (лікарні, бази зв'язку, військові об'єкти тощо), де безперервність живлення – пріоритет [18].

Отже, класифікація ГЕС за джерелами, схемою та масштабом дозволяє зрозуміти конструктивне різноманіття цих систем. Багато реальних гібридних енергосистем поєднують відразу кілька підходів – наприклад, сонячно-вітрова мікромережа з дизельним резервом і батареями буде одночасно відновлювальною за джерелами, комбінованою за схемою (містить і паралельні АС-з'єднання, і накопичувач на DC-шині) та автономною за призначенням.

Під архітектурою гібридної енергетичної системи розуміють її загальну структурну схему та режим взаємодії з зовнішньою мережею. Існують кілька базових архітектур ГЕС: системи з акумулюванням енергії або без нього, а також мережеві (інтегровані в електромережу) або автономні (ізолювані). Комбінація цих ознак визначає чотири узагальнені типи архітектур [7]:

Більшість сучасних ГЕС використовують один або кілька видів накопичувачів енергії (battery storage, гідроакумуляція, водень тощо) як невід'ємний компонент. Системи з накопичувачами здатні запасати надлишкову енергію від джерел у періоди низького споживання і віддавати її під час пікових навантажень або простою генераторів. Наявність акумуляторів суттєво підвищує надійність і якість електропостачання: вони згладжують коливання вихідної потужності від ВДЕ та забезпечують резерв на випадок раптового падіння генерації.

Гібридна система з батареями, як правило, працює так: коли відновлювані джерела (сонце, вітер) генерують більше енергії, ніж споживається, надлишок спрямовується на заряд акумуляторів. Коли ж генерації недостатньо (наприклад, ніч або штиль), накопичена енергія

вивільняється з батарей, покриваючи дефіцит. Якщо і батарея розряджена, тоді вмикається резервний генератор або підживлення з мережі. Таким чином досягається безперервність енергопостачання. Згідно з оглядами, конфігурація ГЕС може бути реалізована з накопичувачами або без, і кожна з цих опцій має свої переваги та недоліки. Наявність накопичувача підвищує автономність і економічність системи, але збільшує початкові інвестиції та складність управління [15].

Приклад: у гібридній системі “сонячні панелі + дизель + батарея” акумуляторний блок грає роль буфера між сонячною станцією та дизель-генератором. В оптимізованому режимі дизель може взагалі не працювати навантаження – він лише періодично вмикається для підзарядки батарей, тоді як більшу частину часу живлення дають сонячні панелі і батарея. Така схема зменшує час роботи двигуна, економить паливо і знижує викиди CO₂, водночас забезпечуючи стабільну роботу об’єкта навіть вночі чи при слабкому сонці. Отже, архітектура з накопичувачем забезпечує максимальну гнучкість та якість енергії, особливо цінну в автономних системах.

Це спрощені ГЕС, які не мають окремого сховища енергії. Системи без накопичувачів розраховані на те, що баланс потужності забезпечується між самими джерелами генерації та (за потреби) зовнішньою мережею. У денний час такі системи споживають електроенергію прямо від ВДЕ, а за відсутності генерації автоматично переключаються на інші джерела або мережу. Наприклад, поширений варіант – *сонячно-дизельна установка без батарей*: поки світить сонце, навантаження частково чи повністю живиться від фотоелектричних панелей, а коли сонячної потужності не вистачає (вечір, хмарність) – одразу підключається дизель-генератор, регулюючи свою потужність під поточне споживання. Відсутність проміжного накопичення зменшує вартість і спрощує систему, але дизельному двигуну у такій схемі доводиться часто запускатися та працювати непостійно, що може знижувати паливну ефективність та ресурс обладнання. Вітро-дизельні ГЕС без батарей

також використовуються на віддалених об'єктах: поки є вітер – навантаження бере енергію від вітротурбіни, при штилі – запускається генератор [2].

Зазвичай безакумуляторні гібридні системи вимагають постійного балансу генерації і споживання в режимі реального часу. Якщо система підключена до централізованої мережі, тоді баланс досягається обміном енергією з цією мережею (надлишок видається в мережу, а дефіцит покривається від мережі). В автономних же системах без накопичувача резервним регулятором балансу слугує, як правило, паливний генератор, що оперативно змінює свою вихідну потужність відповідно до коливань ВДЕ. Таким чином, хоча відсутність акумуляторів здешевлює систему, вона робить її більш залежною від паливних джерел чи мережі та менш гнучкою у покритті піків навантаження. На практиці великі довгострокові проєкти ГЕС майже завжди включають хоча б мінімальні системи зберігання для покращення показників надійності та економії палива [2].

Мережевою або *grid-tied* називають гібридну систему, що *постійно підключена до загальної електричної мережі* і може передавати або отримувати з неї електроенергію. Інтеграція з мережею означає, що ГЕС працює синхронно з зовнішньою енергосистемою і по суті є її складовою частиною. Подібні гібридні установки зазвичай використовуються для зменшення споживання електроенергії з мережі (через генерування власної відновлюваної енергії) та підвищення якості і надійності енергопостачання на стороні споживача. У разі профіциту генерації гібридна система може навіть віддавати надлишок у мережу (як це роблять, наприклад, домашні сонячні станції за “зеленим” тарифом). Якщо ж власних джерел не вистачає, система автоматично добирає різницю з центральної мережі.

У мережевій архітектурі ГЕС виконує роль *активного споживача-виробника* (prosumer). Вона потребує наявності синхронізуючих інверторів та систем релейного захисту, які б відключали генерацію при аваріях або відсутності напруги в мережі (для безпеки персоналу). Важливою перевагою інтеграції з мережею є те, що централізована мережа фактично

служує буфером: вона приймає надлишки і постачає дефіцит, завдяки чому власний накопичувач енергії може бути меншим або взагалі не потрібен. Наприклад, мережеві сонячні гібридні станції з батареями можуть налаштовуватися так, що в першу чергу заряджають акумулятори, потім продають зайву енергію в мережу. При слабкому сонці вони спершу використовують власний запас у батареях, а якщо його бракує – автоматично беруть енергію з мережі. Таким чином досягається оптимальне використання власних ВДЕ за гарантованої підтримки від енергосистеми [2].

Мережеві ГЕС широко застосовуються в міських умовах і на виробництвах, де є надійний зв'язок з електромережею. Вони сприяють декарбонізації, оскільки дозволяють максимально використовувати чисту енергію, не жертвуючи надійністю. Водночас при масовому впровадженні таких систем виникають питання регулювання і управління з боку центральної мережі, адже велика кількість розподілених гібридних генераторів впливає на режими роботи енергосистеми. Тому сучасні дослідження приділяють увагу координації мережевих ГЕС та врахуванню їх впливу при плануванні розвитку електромереж.

Автономна ГЕС – це гібридна система, *що працює ізольовано від загальної мережі*, повністю самостійно забезпечуючи всі потреби в електроенергії на певному об'єкті або території. Такі системи також називають *острівними* або *off-grid*. Вони є основою багатьох мікромереж, про які згадувалося вище. Архітектурно автономна гібридна система повинна самостійно підтримувати баланс потужності, частоту та напругу в своїй внутрішній мережі. Тому вона, як правило, комплектується більш розвиненими засобами контролю і резервування [7].

Типова автономна ГЕС об'єднує кілька локальних джерел (сонячні панелі, вітротурбіни, невеликі генератори на біопаливі чи дизелі) та накопичувачі енергії, з'єднані в єдину мікромережу. Один з інверторів в системі виконує роль *віртуального генератора* або ведучого, задаючи частоту і напругу мережі (так званий *grid-forming inverter*), інші джерела

підлаштовуються під нього. При змінах навантаження система управління розподіляє навантаження між джерелами: наприклад, при зростанні споживання може збільшити відбір від батареї чи ввімкнути дизель. У часи низького навантаження, навпаки, заряджає акумулятори надлишком генерування. Мета – уникнути простоїв і перевантажень, тримаючи параметри електроенергії в межах норми.

Головна особливість автономної архітектури – високі вимоги до надійності та резервування. Оскільки відсутня підтримка з боку великої мережі, система мусить мати достатні резервні потужності та ємність накопичувачів, щоб витримати навіть тривале зниження генерації чи пікові навантаження. З цієї причини у віддалених автономних ГЕС часто встановлюють надлишкову (дублюючу) генерацію та декілька рівнів резерву. Наприклад, на випадок затяжної негоди в гібридній системі можуть бути передбачені два дизель-генератори: один основний, другий резервний. Крім того, для оптимальної роботи автономна ГЕС потребує розумної системи керування навантаженнями – аж до відключення другорядних споживачів при дефіциті енергії, щоб критичні споживачі були забезпечені. Завдяки комплексному підходу сучасні автономні гібридні установки досягають високої автономності та якості живлення, забезпечуючи електроенергією райони, де відсутня централізована інфраструктура. Вони довели ефективність на віддалених островах, у гірських поселеннях, на об'єктах зв'язку, у військових таборах тощо, значно знижуючи залежність від привізного палива. Згідно з досвідом, впровадження таких систем підвищує енергетичну безпеку і стійкість регіонів: навіть при аваріях у великій енергосистемі автономна мікромережа продовжує функціонувати [15].

Гібридні енергетичні системи поєднують різномірні технології, тому для їх ефективної роботи необхідно враховувати ряд технічних особливостей і забезпечити виконання певних вимог. Основні аспекти включають: системи керування енергією, накопичувачі енергії, інвертори та силова електроніка, а також показники гнучкості, ефективності та надійності системи.

Система управління енергопотоками – це “мозок” гібридної установки. Від її якості залежить узгоджена робота всіх компонентів. Управління ГЕС значно складніше, ніж окремої електростанції, адже потрібно координувати роботу декількох генераторів і накопичувачів, які мають різні динамічні характеристики та обмеження. Дослідники відзначають, що аналіз і оптимізація гібридних систем – нетривіальне завдання, яке вимагає спеціалізованих методів і програмних інструментів. Алгоритми енергоменеджменту повинні в реальному часі вирішувати, яке джерело скільки потужності має видати, коли заряджати чи розряджати батареї, коли запускати резервний генератор, та ін. Основна ціль – забезпечити баланс енергії при мінімальних витратах і дотриманні технічних умов (не перевантажувати обладнання, підтримувати частоту та напругу) [10].

У сучасних ГЕС застосовуються інтелектуальні системи керування, які моніторять стан батарей, прогноз погоди, графік навантаження і відповідно до цього оптимізують режим роботи. Використовуються як традиційні алгоритми (набір правил, логіка на основі порогів), так і складніші – наприклад, прогнозно-адаптивні моделі, методи машинного навчання для прогнозування генерації, оптимізаційні методи (лінійне програмування, рій частинок, генетичні алгоритми) для планування добового графіка роботи джерел. Важливим завданням енергоменеджменту є маневрування потужністю: при швидких змінах генерації ВДЕ (раптовий порив вітру або навпаки затінення сонця хмарами) система управління повинна миттєво відреагувати – збільшити відбір енергії в батарею або навантажити додатково дизель-генератор, щоб частота і напруга в мережі лишилися сталими. Для цього контролери джерел тісно взаємодіють між собою, часто через централізований енергоцентр, або за децентралізованою схемою (кожен компонент реагує на зміни параметрів мережі за заданими правилами). В підсумку, надійна й швидкодіюча система керування є критично важливою технічною умовою ефективної ГЕС [7].

Накопичувачі енергії (аккумуляторні батареї, суперконденсатори, системи зберігання на основі водню, маховики, тощо) – ключовий елемент більшості гібридних систем, який забезпечує енергетичну рівновагу. Вибір і параметри накопичувача значною мірою визначають характеристики ГЕС: час автономної роботи без генерації, максимальне навантаження, яке система може покрити без запуску резерву, тощо. Найпоширеніші сьогодні – хімічні батареї (аккумулятори), зокрема літій-іонні, завдяки їх високій питомій ємності та ефективності. При проектуванні ГЕС ємність батарей розраховують виходячи з профілю генерації та споживання: вона має бути достатньою, щоб накопичити надлишок енергії від ВДЕ у періоди мінімального навантаження і віддати його в піки або при відсутності генерації. Наприклад, автономна система на будинок часто розраховується так, щоб батарей вистачило на 1–2 доби споживання – на випадок негоди. В той же час забагато аккумуляторів – це значне збільшення вартості і втрат енергії при перетворенні, тому шукається компроміс [3].

Технічні вимоги до накопичувачів у гібридних системах високі. Вони працюють у циклічному режимі щоденного заряду-розряду, часто з глибокою глибиною розряду, тому потрібні батареї з великим ресурсом циклів (тисячі циклів) і надійною системою управління батареєю (Battery Management System, BMS). BMS контролює напругу, температуру, заряд кожного модуля, захищаючи від перенапруги чи надмірного розряду, балансує елементи. Окрім електрохімічних, знаходять застосування й інші види сховищ. Наприклад, у вітро-дизельних комплексах для згладжування короточасних коливань вітрової генерації можуть використовуватись суперконденсатори – вони мають малу ємність, але здатні дуже швидко заряджатися/розряджатися, компенсуючи секундні провали до запуску основних регуляторів. В гібридних системах на базі великих вітро- чи сонячних електростанцій все частіше використовують водневі сховища: надлишок енергії витрачається на електроліз води і зберігання водню, а за потреби водень спалюється в

паливному елементі, генеруючи електрику. Така схема поки дорога, але дає змогу сезонного накопичення енергії.

Одним з показників ефективності ГЕС є коефіцієнт використання ВДЕ – скільки відсотків виробленої, скажімо, сонячної енергії реально спожито, а не втрачено. Наявність місткого накопичувача підвищує цей показник, наближаючи споживання до генерації. Таким чином, системи зберігання – необхідна складова для забезпечення енергетичного балансу і підвищення гнучкості роботи гібридних комплексів [14].

Силова електроніка виконує роль “сполучної ланки” між різними компонентами ГЕС. Сонячні фотомодулі і батареї дають постійний струм, вітрові генератори – змінний з непостійною частотою, дизель-генератори – змінний з фіксованою частотою. Для об’єднання цього різноманітного набору в єдину систему необхідні перетворювачі: інвертори, випрямлячі, DC/DC-конвертори. Гібридна система містить кілька типів інверторів: мережеві (що синхронізуються із зовнішньою мережею), автономні (що формують власну мікромережу), батарейні (двонапрямні інвертори для заряду/розряду акумуляторів), тощо. Від їх якості залежить стабільність напруги, частоти, рівень гармонік у системі, а також узгодженість роботи джерел.

Ключовий компонент – інвертор з функціями управління живленням. Він відповідає за підтримання потрібної величини змінної напруги та частоти, автоматичне перемикання між джерелами (наприклад, відключити мережу і увімкнути батареї при аварії). Сучасні інвертори оснащені вбудованими контролерами, що реалізують алгоритми розподілу навантаження між джерелами, слідкують за якістю електроенергії (коефіцієнт потужності, гармоніки) і забезпечують захист від перегрузок та коротких замикань [20].

Особливу увагу приділяють сумісності та надійності силовій електроніки. В ГЕС одночасно працює багато перетворювачів, які можуть впливати один на одного через спільну шину – наприклад, викликати

коливання напруги або резонанси. Тому при проектуванні важливо забезпечити коректну роботу контролерів інверторів у різних режимах (особливо в автономних системах, де інвертор задає опорну частоту). Також необхідно врахувати електромагнітну сумісність, фільтрацію вищих гармонік, реактивну потужність тощо.

Оскільки інвертори є одним з найдорожчих і найвразливіших елементів (через силові напівпровідники, що працюють у важких режимах), до них висуваються вимоги по резервуванню і обслуговуванню. У критичних ГЕС важливі компоненти дублюються: наприклад, ставлять два інвертори меншої потужності замість одного великого – при виході з ладу одного система продовжить роботу на половинній потужності. Розвиток силової електроніки (нові топології перетворювачів, SiC-транзистори з високою частотою перемикачів тощо) безпосередньо сприяє підвищенню ефективності гібридних систем, зменшенню втрат при перетворенні та покращенню якості електроенергії. Таким чином, надійні та високоефективні інвертори – це “серце” гібридної енергосистеми, яке забезпечує інтеграцію усіх її складових в єдине ціле [6].

Однією з головних переваг гібридних систем є їхня гнучкість – здатність адаптивно змінювати конфігурацію виробництва електроенергії залежно від умов. Інтегроване використання різних джерел наділяє ГЕС можливістю швидко реагувати на зміни як з боку генерації, так і з боку навантаження. Наприклад, при раптовому збільшенні споживання гібридна система може одночасно залучити кілька ресурсів: віддати енергію з акумулятора, збільшити вихід потужності вітрогенератора (якщо дозволяє вітер) і запустити дизель-генератор – досягнувши потрібного рівня генерації швидше, ніж це зробило б одне джерело. Гнучкість в часі також проявляється у здатності накопичувати енергію і видавати її тоді, коли вона найбільш потрібна. За рахунок цього гібридні установки можуть зменшити пікові навантаження на мережу (вирівнюючи добовий графік споживання) та впроваджувати більш високий відсоток ВДЕ без загрози надійності.

Дослідження відзначають, що підвищена гнучкість інтегрованих енергосистем прискорює впровадження відновлюваної енергії і наближає перехід до низьковуглецевих енергосистем.

Енергетична ефективність гібридних систем визначається тим, наскільки оптимально вони використовують доступні ресурси. Правильно сконфігурована ГЕС дозволяє працювати кожному джерелу у найбільш вигідному режимі. Наприклад, дизель-генератори найбільш паливно ефективні при навантаженні 70–80% номіналу; у гібридній системі можна забезпечити, щоб дизель працював саме в цьому діапазоні (надлишок йтиме в батарею), замість того щоб марно витрачати паливо на холостому ходу або малих потужностях. Відновлювані джерела в ГЕС працюють з максимальним коефіцієнтом використання – їх енергія або споживається безпосередньо, або акумулюється, мінімізуючи втрати. Як результат, сумарний ККД системи вищий, ніж у випадку розрізнених компонентів. Практичні реалізації підтверджують, що гібридні схеми дозволяють *зменшити витрати палива* і експлуатаційні витрати на 20–50% (залежно від частки ВДЕ), а втрати енергії при цьому мінімізуються. Ефективність підвищується і за рахунок оптимального керування: сучасні алгоритми можуть прогнозувати зміни погоди чи тарифів і завчасно зарядити або розрядити накопичувач для максимальної вигоди. Таким чином, добре спроектована гібридна система забезпечує високий рівень енергоефективності та економічності роботи [9].

Для енергосистеми, особливо автономної, надійність є критичною характеристикою. Гібридний підхід загалом підвищує надійність електропостачання, оскільки передбачає дублювання джерел: якщо одне джерело тимчасово недоступне (наприклад, затишшя для вітру або ніч для сонця), інше може компенсувати нестачу. Навіть відмова окремого модуля не призводить до повного знеструмлення, як це могло б статись у системі з єдиним генератором – інші компоненти беруть на себе його навантаження. Статистично, комбінування джерел з різною природою змінності зменшує сумарну варіабельність генерації та ризик одночасного глибокого провалу

потужності. До того ж, наявність накопичувачів забезпечує час резервування: поки одні джерела відновлюються або запускаються (наприклад, потрібно кілька секунд чи хвилин, щоб вийти на режим дизелю або газовій турбіні), батарея може підтримувати навантаження. Ці фактори роблять гібридні системи більш стійкими до збоїв та зовнішніх впливів [20].

Проте, щоб реалізувати цей потенціал, необхідно грамотно спроектувати резервні потужності і стратегії аварійного керування. У ГЕС вводяться додаткові рівні резервування – як активного (надлишкові генеруючі модулі), так і пасивного (резерв по ємності батарей, пальне на визначений час автономної роботи і т.д.). Система захистів повинна коректно розпізнавати аварійні ситуації (перевантаження, короткі замикання, вихід параметрів за допустимі межі) і відключати або ізолювати проблемні ділянки, не гасячи при цьому всю систему. Для автономних мікромереж особливо важливий чорний старт – здатність відновити живлення після повного знеструмлення. У гібридній системі цю функцію можуть виконувати або швидкі джерела (акумулятори), або спеціальний резервний генератор, який запускається першим і дає живлення для старту інших компонентів. Надійність також забезпечується системами моніторингу стану обладнання: контролери постійно відстежують температуру інверторів, заряд батарей, витрати палива, тощо, і попереджають операторів про необхідність обслуговування [15].

На основі досвіду впровадження численних проектів, гібридні енергетичні системи демонструють високий рівень безвідмовності та якості електропостачання за умови дотримання всіх технічних вимог. Вони здатні поєднати гнучкість відновлюваних джерел з стабільністю традиційної генерації, досягаючи синергії, яка є надзвичайно актуальною для сучасної енергетики. ГЕС вже успішно працюють у різних куточках світу – від живлення телекомунікаційних веж у пустелях до забезпечення енергією островів – доводячи свою ефективність і перспективність. Подальший розвиток технологій накопичення та керування лише розширить можливості

гібридних систем, роблячи їх ключовим елементом перехідного етапу до стійкої, розумної енергетичної інфраструктури майбутнього

1.3. Чисельні методи, що застосовуються у моделюванні ВДЕ-систем

Скінченно-різницеві методи ґрунтуються на апроксимації похідних у диференціальних рівняннях за допомогою різниць на регулярній ґратці. Наприклад, похідну за координатою можна замінити на різницю значень функції у сусідніх вузлах. FDM зазвичай застосовують до задач теплопровідності та хвильових процесів з простими геометріями (плоскі чи одномірні області). Перевагами FDM є простота реалізації і відносно мала обчислювальна складність для одномірних задач. Недоліками є обмежена гнучкість при складних геометріях та необхідність дотримання умов стійкості (наприклад, обмеження Шварцшильда для явних схем). У контексті ВДЕ FDM використовують, наприклад, для моделювання розподілу температури в ґрунті або в простих моделях сонячних колекторів [8].

Скінченно-елементний метод розбиває досліджувану область на набір малих елементів і будує наближене рішення через локальні базисні функції. Диференціальні рівняння перетворюються на систему алгебраїчних рівнянь у слабкій формі. ФЕМ дозволяє моделювати складні геометрії та неоднорідні матеріали, що важливо для сонячних та вітрових систем (наприклад, розрахунок нагріву PV-модулів або напружень у лопатях вітротурбіни). Як зазначено в дослідженні [1], застосування FEM до задач теплопередачі є потужним засобом: він точно описує розподіл температури у матеріалах при довільних граничних умовах (за рахунок розбиття області на елементи), але вимагає обережного вибору параметрів (властивостей матеріалів і умов на границях) і якості сітки. Сильні сторони FEM: висока точність і гнучкість у моделюванні складних конструкцій, а слабкі – велика обчислювальна вартість та потреба у ретельному генеруванні сітки.

Скінчені об'єми зводять рівняння потоку чи теплопередачі до інтегральних форм на невеликих об'ємах (контрольних об'ємах). Застосовуючи теорему Остроградського–Гаусса, інтеграли з дивергенцією перетворюють на поверхневі потоки через грані об'ємів. Таким чином забезпечується локальний баланс потоку між суміжними об'ємами, і метод гарантовано зберігає масу та енергію. FVM особливо широко використовують у обчислювальній гідродинаміці (CFD) і аеродинаміці: наприклад, для моделювання обтікання вітрових турбін повітрям чи розподілу тепла у системах тепловідводу. До переваг методу скінченних об'ємів належить природна консервативність і здатність працювати з нерегулярними сітками, що корисно при складних геометріях систем ВДЕ. Серед недоліків можна зазначити необхідність точного обчислення потоків через грані та можливі чисельні дифузійні ефекти при грубому розбитті сітки.

Метод Монте-Карло – це статистичний чисельний метод, що ґрунтується на багаторазовому випадковому відборі вхідних параметрів для моделювання невизначеностей. Приклад алгоритму: для випадково згенерованих наборів вхідних даних (наприклад, погодні умови, вихідні характеристики генераторів, фактори відмов) обчислюють результат (наприклад, вироблення енергії), потім аналізують розподіл отриманих результатів. Monte Carlo генерує розподіл можливих виходів, з якого можна вивести характеристики невизначеності. Основна перевага – можливість врахувати складні стохастичні процеси та кореляції між параметрами; крім того, метод легко реалізується та паралелізується. Серед недоліків – велика обчислювальна витратність (потрібно багато ітерацій для статистичної достовірності) і присутність статистичної похибки. У сфері ВДЕ Monte Carlo застосовують, наприклад, для оцінки надійності та непевності в гібридних системах, прогнозу довгострокового виробітку вітрових станцій або варіабельності сонячної генерації. Як показано у дослідженні, метод Монте-Карло дає «прямую оцінку» невизначеності АЕР шляхом випадкової

вибірки відповідних параметрів, що робить його ефективним для врахування багатьох джерел невизначеності [15].

Методи оптимізації використовують математичні моделі для знаходження найкращого рішення (максимуму корисної дії чи мінімуму витрат) за заданих обмежень. У ВДЕ часто застосовують: лінійне програмування (LP) та його розширення з цілочисловими змінними (MILP) – для лінійних задач планування; нелінійне програмування (NLP) – коли цільова функція чи обмеження нелінійні; еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми, PSO, тощо) – для задач з дискретними параметрами або багатокритеріальних задач, коли неможливо одержати похідні. LP/MILP дають гарантовані оптимальні рішення для лінійних моделей, але часто вимагають апроксимації або лінеаризації складних залежностей (що знижує точність). Наприклад, у MILP доводиться «лінеаризувати» складні фізичні співвідношення, що призводить до компромісу між оптимальністю і складністю. Недолік MILP – різке зростання обчислювальної складності при збільшенні кількості змінних чи часових інтервалів. Еволюційні алгоритми (GA, PSO) можуть знаходити рішення в складних нелінійних просторах без градієнтів, однак вони потребують численних ітерацій і ретельного налаштування параметрів; крім того, вони не гарантують знаходження глобального оптимуму і досить повільні. Методи оптимізації застосовують для проектування й планування: наприклад, оптимального добору розмірів PV-модулів та вітротурбін у гібридних системах, оптимального розподілу потужності у мікромережі тощо [8].

Методи машинного навчання (МН) – це статистичні алгоритми, які «навчаються» на даних без явного програмування. У прогнозуванні генерації ВДЕ найбільш поширені методи із надзору (регресія, дерева рішень, нейронні мережі тощо), без надзору (кластеризація, пошук аномалій) та підкріплення (відповідні випадки оптимізації управління). Такі моделі здатні враховувати нелінійні залежності між вхідними даними (погодні параметри, характеристики обладнання, історичні виміри) та виходами (навантаження,

генерація). Наприклад, нейронні мережі та ансамблеві методи (Random Forest, XGBoost) успішно прогнозують вітрову та сонячну генерацію на короткі та середні терміни, підвищуючи точність порівняно з класичними статистичними моделями. До переваг МН належать можливість навчання на великих масивах даних та адаптивність до змін умов; при цьому МН-моделі можуть виявляти приховані закономірності, недоступні фіксованим математичним моделям. Недоліки – потреба у великих датасетах для навчання, ризик перенавчання та втрати фізичної інтерпретованості моделі. Застосування МН у ВДЕ включає прогнозування виробітку енергії (сонце, вітер, біомаса), оцінку попиту та оптимальне керування системою на основі прогнозів. Як відзначають дослідники, методи МН дозволяють покращити прогнозування генерації ВДЕ, забезпечуючи більш ефективне управління енергосистемами [9].

Для підвищення точності та ефективності моделювання часто поєднують декілька методів. Прикладом є гібридні моделі, які інтегрують фізичні розрахунки з методами МН або оптимізації. Наприклад, для прогнозування виробітку можуть використовуватися фізичні моделі погоди в зв'язці з МН-моделями (так зване «фізико-статистичне» моделювання). Інший підхід – спільне застосування чисельної симуляції (FEM/FVM) та алгоритмів оптимізації для одночасного моделювання процесів та пошуку оптимального керування чи розмірів системи. Також поширені багатокритеріальні гібридні алгоритми (наприклад, NSGA-II) для одночасної оптимізації економічних, енергетичних і екологічних показників гібридних ВДЕ. У цілому гібридні моделі, що поєднують прогнозування, оптимізацію і симуляцію, визнаються найбільш перспективними для планування та управління ВДЕ. Наприклад, поєднання енергетичного балансу з ML-прогнозами або сумісне використання FVM і FEM для мультифізичних розрахунків дозволяє врахувати більше факторів, хоча такі підходи потребують більшої обчислювальної складності та узгодження різних методів.

1.4. Аналіз існуючих програмних рішень для симуляції та оптимізації ВДЕ-комплексів

Сучасні програмні інструменти моделювання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) застосовуються для вирішення широкого спектра завдань при проєктуванні та аналізі енергетичних систем. Техніко-економічне обґрунтування – оцінка доцільності впровадження ВДЕ-комплексів з точки зору економічної ефективності та технічної здійсненності. На цьому етапі проводиться розрахунок необхідної потужності установок, вироблення електроенергії за рік, початкових інвестицій, експлуатаційних витрат та економічних показників (вартість кіловат-години, період окупності тощо). Моделювання дозволяє порівняти різні сценарії та конфігурації системи, визначити оптимальний склад обладнання з огляду на мінімізацію собівартості енергії або максимізацію прибутку. Результати такого техніко-економічного аналізу слугують базою для прийняття рішення щодо реалізації проєкту. Оптимізація структури енергосистеми – пошук найкращої конфігурації гібридної ВДЕ-системи (складу генеруючих джерел і накопичувачів) для досягнення заданих критеріїв оптимальності. Зазвичай критерії – мінімум приведеної вартості системи або тарифу на енергію, максимум частки відновлюваної енергії, забезпечення надійності живлення тощо. Програмні комплекси перебирають різні комбінації обладнання (сонячні панелі, вітротурбіни, дизель-генератори, акумулятори тощо) і моделюють їх роботу протягом тривалого періоду (рік і більше) з кроком годину або менше. На основі цих симуляцій вибирається конфігурація з найкращими показниками. Таким чином вирішуються задачі оптимального розміру та складу системи (найкращий баланс потужностей різних джерел) і задачі оптимального керування (стратегії заряд/розряд акумуляторів, черговість запуску генераторів) [2].

Розрахунок генерації та продуктивності – імітація роботи ВДЕ-установок для прогнозування виробітку електроенергії за різних умов. Зокрема, для сонячних електростанцій моделюється генерація фотоелектричних модулів за погодинними метеоданими (інсоляція, температура) з урахуванням кута нахилу панелей, затінення, характеристик інверторів тощо. Для вітрових турбін – розрахунок виробітку за профілем швидкості вітру, кривою потужності турбіни і висотою щогли. Програмні засоби прогнозування генерації дають змогу оцінити річний виробіток енергії, коефіцієнт використання встановленої потужності, вплив змін погоди або розташування. Це важливо як для техніко-економічних оцінок, так і для планування режимів роботи енергосистеми.

Моделювання мікромереж – детальне симулювання роботи автономних або мережевих розподілених енергосистем, що містять кілька джерел енергії, накопичувачі та змінні навантаження. Моделювання мікромережі дозволяє проаналізувати взаємодію компонентів у часовому розрізі: баланс потужності в кожен момент, перетоки енергії між джерелами і накопичувачами, реагування на зміни навантаження або ресурсу (сонця, вітру), перемикання режимів мережа/острів. Такі симуляції необхідні для відпрацювання алгоритмів керування мікромережею, оцінки її надійності, частки ВДЕ в покритті навантаження, паливної економії (для гібридних систем з генераторами) тощо [15].

Аналіз стійкості та якості електроенергії – дослідження динамічної стійкості енергосистеми з ВДЕ та впливу ВДЕ-генерації на параметри якості електричної енергії. Динамічні моделі дозволяють перевірити стійкість системи при збуреннях (раптове відключення генератора, зміна навантаження, перехід мікромережі в ізолюваний режим) – оцінюється поведінка частоти та напруги, спрацювання автоматики, можливі коливання. Іншим аспектом є якість електроенергії: наприклад, через інверторні джерела можуть виникати гармоніки напруги, коливання напруги при змінному сонячному ресурсі, проблеми з підтриманням заданої частоти в ізолюваній

мікромережі. Спеціалізоване програмне забезпечення дає можливість моделювати перехідні процеси, аналізувати спектр гармонік, перевіряти відповідність показників якості стандартам. Це особливо важливо для великих ВДЕ-проектів, що приєднуються до мережі, де необхідно гарантувати стійкість роботи енергосистеми з високою часткою ВДЕ.

Зазначені завдання можуть вирішуватися послідовно або паралельно на різних етапах проектування. Як правило, на етапі концепції виконують спрощений техніко-економічний розрахунок і оптимізацію конфігурації, далі – детальне моделювання генерації та роботи системи, і на завершення – аналіз стійкості при інтеграції в електромережу (для промислових об'єктів). Для кожного типу задачі існують свої найбільш придатні програмні інструменти. Наприклад, для оптимізації систем часто використовують HOMER або подібні моделі, для прогнозу генерації – PVsyst, SAM, для аналізу електричних режимів – пакети електроенергетичного моделювання (PSS/E, PowerFactory тощо). Далі розглянуто ключові програмні засоби, що застосовуються у сфері симуляції та оптимізації ВДЕ-комплексів, та наведено їх порівняння за функціональними можливостями [5].

Нижче подано огляд найпоширеніших програмних рішень, які використовуються для моделювання, оптимізації та аналізу систем на базі відновлюваних джерел енергії. Кожен із наведених інструментів має свою спеціалізацію та сферу застосування.

HOMER Pro – програмний комплекс для оптимізації гібридних енергосистем (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources), спочатку розроблений у NREL (США). HOMER моделює роботу автономних або частково автономних систем протягом тривалого часу (рік з часовим кроком 1 год) і комбінує результати симуляції з економічним аналізом. Інструмент перебирає різні комбінації обладнання (фотоелектричні панелі, вітрогенератори, дизель-генератори, акумулятори, мікроГЕС тощо) та визначає конфігурацію з мінімальною сумарною вартістю або заданим критерієм оптимальності. HOMER дозволяє враховувати зміну навантаження,

вартості пального, тарифів, обмежень по емісіях, проводить чутливий аналіз. Має зручний графічний інтерфейс і вбудовані бібліотеки компонентів. Наразі HOMER Pro є фактичним промисловим стандартом у сфері проєктування мікромереж та автономних систем живлення. Програмне забезпечення пропонується на комерційній основі (платна ліцензія), розробник – компанія HOMER Energy by UL. Код закритий, але для навчальних і невеликих проєктів доступна пробна або обмежена безкоштовна версія.

PVsyst – спеціалізований програмний пакет для моделювання фотоелектричних систем. Розроблений в Університеті Женеви (Швейцарія) в 1990-х роках (автор – А. Мермуд) і надалі розвинений як комерційний продукт [2]. PVsyst дозволяє виконати повний цикл проєктування PV-станції: від оцінки ресурсу сонячної радіації та підбору конфігурації масиву панелей і інверторів – до детального годинного симулювання виробітку електроенергії протягом року. Програма містить велетенську базу даних метеостанцій і кліматичних даних, а також бібліотеку панелей та інверторів різних виробників. Під час моделювання враховуються всі основні втрати і фактори: кут нахилу та орієнтація, затінення (віддалене горизонтом і близьке від предметів), температуру панелей, характеристики інвертора, відмови обладнання тощо. Результатом є докладний баланс втрат і річне виробництво, яке можна порівняти з експериментальними даними. PVsyst широко використовується інженерами і дослідниками для оцінки продуктивності як автономних, так і мережевих фотоелектричних систем. Інтерфейс – графічний, зручний для користувача; передбачено генерацію звітів і графіків. ПЗ розповсюджується на комерційній основі (платна ліцензія), пробна версія має обмеження за розміром проєкту. Код програми закритий [2].

System Advisor Model (SAM) – інтегрована модель оцінки продуктивності та фінансових показників енергетичних проєктів на базі ВДЕ, розроблена в NREL (США). SAM підтримує кілька технологій: фотоелектричні системи (у тому числі з відстеженням за сонцем),

концентраторні сонячні електростанції (CSP), вітроенергетичні установки, системи з біомасою, геотермальні, малі ГЕС, а також моделювання накопичувачів (акумуляторів) і допоміжних компонентів. Особливістю SAM є поєднання точного інженерного моделювання виробітку енергії з докладним фінансовим аналізом проекту: враховуються інвестиційні витрати, структура фінансування, відсоткові ставки, деградація панелей, тарифи на електроенергію, податкові пільги тощо. Це дозволяє обчислити показники економічної ефективності – рівень беззбитковості, LCOE, NPV, період окупності – паралельно з оцінкою виробництва енергії. Інтерфейс SAM побудований у вигляді послідовного майстра вводу даних, має багато графіків і таблиць результатів, а також вбудовану мову скриптів для автоматизації серій розрахунків. SAM є безкоштовним для користувачів (поширюється як freeware); вихідний код основних розрахункових модулів відкритий (ядро моделі SSC викладено NREL у відкритий доступ) [18].

TRNSYS – Transient System Simulation Tool, універсальна система транзйєнтного моделювання енергетичних систем. TRNSYS розроблена в Університеті Вісконсін-Медісон (США) і відома з 1970-х років як гнучкий інструмент для імітації динамічних процесів у системах тепло- та енергопостачання [4]. Принцип TRNSYS – модульна структура: система надає бібліотеку компонентів (так званих “типів”) – від моделей будівель та HVAC-обладнання до моделей різних установок ВДЕ, – які користувач може графічно з’єднувати між собою, задаючи схему системи. Для відновлюваної енергетики доступні спеціальні бібліотеки компонентів: моделі фотоелектричних панелей, батарей, віротурбін, паливних елементів тощо. TRNSYS дозволяє виконувати деталізоване моделювання перехідних процесів з малим часовим кроком (від секунд і менше), що важливо для аналізу керування, теплових режимів, поведінки систем з накопичувачами. Інтерфейс складається з графічного середовища для складання блок-схеми (TRNSYS Studio) та числового ядра розрахунку. За потреби користувач може створювати власні модулі (на мовах Fortran, C++), що додає гнучкості при

наукових дослідженнях. TRNSYS є комерційним продуктом (платна ліцензія для версії 18 на 2022 рік), вихідний код ядра закритий, але відкриті коди компонентів можуть надаватися для користувацьких змін. Програму широко використовують в академічних дослідженнях для моделювання складних систем з ВДЕ, зокрема для симуляції енергоспоживання будівель з ВДЕ, оптимізації керування гібридними системами тощо [9].

MATLAB/Simulink – універсальне середовище математичного моделювання і систем автоматизованого проектування від компанії MathWorks [5]. Хоча Simulink не є спеціалізованим пакетом саме для ВДЕ, він надзвичайно популярний у наукових і інженерних колах для моделювання *електроенергетичних систем, силової електроніки та систем керування*. За допомогою бібліотеки Simscape Power Systems (раніше SimPowerSystems) в середовищі Simulink можна створювати детальні моделі електричних мереж, генераторів, ліній, перетворювачів, а також відновлюваних джерел – зокрема, наявні готові блоки фотоелектричних модулів, вітрових турбін із системами контролю, моделей батарей тощо. Інженери часто використовують Simulink для дослідження стійкості та регулювання в електромережах з ВДЕ, розробки і тестування алгоритмів керування інверторами, перевірки роботи систем з накопичувачами в режимі реального часу. Інтерфейс Simulink – графічний (блок-схемне моделювання), що спрощує візуалізацію структури системи, але вимагає глибоких знань теорії для побудови адекватної моделі. MATLAB/Simulink – комерційне програмне забезпечення (дорога ліцензія), поширене головню в університетах та науково-дослідних установах; вихідний код закритий, проте користувач може підключати власні програмні модулі, що інтегруються з моделлю [17].

OpenDSS – відкритий симулятор розподільчих електричних мереж, розроблений Electric Power Research Institute (EPRI, США). Назва розшифровується як *Open Distribution System Simulator*, що відображає призначення: моделювання режимів електричних мереж низької та середньої напруги з великою кількістю розподілених джерел енергії. OpenDSS

використовується для аналізу впливу масового підключення ВДЕ (наприклад, дахових PV-систем) на параметри мережі: профілі напруги вздовж фідера, втрати потужності, перевантаження ліній, рівень гармонік тощо. Інструмент підтримує квазістаціонарне часове моделювання (QSTS) – багаторазове розрахування усталеного режиму для послідовності часових точок (наприклад, кожні 15 хв протягом року) з метою оцінки довгострокових ефектів роботи ВДЕ в мережі. OpenDSS має текстовий інтерфейс скриптового типу (введення команд сценарію або через COM-інтерфейс з інших мов, таких як Python, MATLAB), а також простий графічний перегляд однолінійної схеми. Програму розповсюджено у відкритому доступі (open-source) – її вихідний код опубліковано EPRI на платформі SourceForge, що дозволяє дослідникам модифікувати код під свої потреби. OpenDSS безкоштовний; в основному його застосовують у дослідженнях і консалтингових проєктах для електроенергетичних компаній з метою оцінки варіантів модернізації мереж при високій проникності ВДЕ [9].

PSS/E – (*Power System Simulator for Engineering*) програмний комплекс для моделювання режимів електроенергетичних систем, розроблений компанією Siemens PTI. PSS/E традиційно застосовується для розрахунку сталих режимів (навантажувальних потоків) та динамічної стійкості в електричних мережах високої напруги (на рівні передачі і розподілу). Це одна з найпоширеніших у світі професійних програм: за даними Siemens, PSS/E використовується більш ніж у 140 країнах і є провідним інструментом для аналізу електричних мереж передачі. Функціонал PSS/E включає розрахунок усталених режимів методом Ньютона-Рафсона, моделювання аварійних ситуацій (N-1 аналіз), розрахунок коротких замикань, моделювання перехідних процесів (динамічний модуль) з використанням докладних моделей генераторів, збуджувачів, турбін, регуляторів, а також оптимізацію режимів (OPF). Існують бібліотеки моделей вітрових установок і ВДЕ-генераторів для динамічних розрахунків, що дозволяє оцінювати стійкість системи при підключенні великих ВДЕ-потужностей. Інтерфейс

PSS/E – десктопний додаток з можливістю скриптового керування (через мову Python), що дає змогу автоматизувати серії розрахунків і інтегрувати PSS/E в складні моделюючі комплекси. Ліцензія на PSS/E є комерційною і високовартісною; вихідний код недоступний користувачу. Цей продукт орієнтований на електроенергетичні компанії, оператора системи передачі, проєктні інститути і вузи [10].

DIgSILENT PowerFactory – потужний програмний комплекс для моделювання електричних систем від компанії DIgSILENT (Німеччина). PowerFactory призначений для аналізу режимів генерації, передачі, розподілу та промислових електричних мереж в єдиному інтегрованому середовищі. Програма охоплює весь спектр задач – від стандартних розрахунків (баланс потужності, короткі замикання, настройки релейного захисту) до передових аналізів, включно з моделями вітропарків, розподіленої генерації, можливістю реального часу (Hardware-in-the-Loop) та моніторингу роботи системи. Особливістю PowerFactory є поєднання зручного графічного інтерфейсу (однолінійні схеми, діалогові вікна обладнання) з гнучкістю скриптів DPL і Python для автоматизації задач, а також унікальна інтегрована база даних, де зберігаються всі дані проєкту. PowerFactory має засоби для моделювання і ВДЕ: наприклад, моделі вітрових турбін типових виробників, моделі PV-інверторів з контролерами, модулі для оцінки надійності, оптимального розподілу потоків. Також підтримується EMT-аналіз (електромагнітні транзйєнти) для дослідження якості енергії та перехідних процесів – ця можливість вигідно відрізняє PowerFactory від PSS/E. ПЗ є комерційним (платна ліцензія); код програми закритий. В основному використовується інженерними компаніями, операторами систем розподілу, а також у наукових дослідженнях, де потрібне детальне моделювання електромереж з ВДЕ [19].

Hybrid2 – програмний інструмент для детального симулювання автономних гібридних енергосистем, що поєднують вітроенергетичні установки, сонячні батареї, дизель-генератори та акумулятори. Розроблений

Університетом Массачусетсу (UMass) за підтримки NREL у 1990-х роках [9]. Hybrid2 реалізує детальний імовірісно-часовий підхід: моделюється кожна година (або менший інтервал) роботи системи протягом року з урахуванням випадкових варіацій вітру та навантаження всередині інтервалу. На відміну від оптимізаційних моделей, Hybrid2 вимагає задання користувачем конкретної конфігурації системи – і далі оцінює її ефективність: скільки електроенергії буде вироблено вітром і сонцем, скільки спожито пального генераторами, який рівень зарядженості акумуляторів по годинах і чи був дефіцит енергії. Програма також виконує детальний економічний аналіз з урахуванням вартості обладнання, пального, обслуговування, і видає показники вартості енергії та економії палива. Інтерфейс Hybrid2 – графічний (Windows-застосунок старої архітектури), містить бібліотеки типового обладнання і шаблони систем. На сьогодні Hybrid2 доступний безкоштовно (UMass надає його як freeware), але не підтримується і сумісний лише з застарілими операційними системами. Код програми закритий і не оновлюється; тим не менш, Hybrid2 історично відіграв важливу роль у верифікації інших моделей і слугував прототипом для сучасних інструментів оптимізації гібридних систем (таких як HOMER) [8].

RETScreen – програмний засіб для експрес-аналізу доцільності проєктів у сфері чистої енергетики, розроблений Канадським центром управління енергією (Natural Resources Canada). RETScreen являє собою інтегровану Excel-подібну програму, що дозволяє оцінити виробництво енергії, економіку та скорочення викидів парникових газів для різних типів технологій – від сонячних і вітрових систем до біомаси, малих ГЕС, когенерації та заходів з енергоефективності. RETScreen має модулі для аналізу енергетичного балансу (на основі кліматичних даних, які імпортуються з вбудованої бази), розрахунку фінансових показників (NPV, IRR, період окупності), ризик-аналізу (чутливісний і сценарний аналіз). Інтерфейс дуже простий: користувач заповнює таблиці даних проєкту і одразу отримує узагальнюючі результати і звіти. RETScreen часто використовується на ранніх етапах

скринінгу проєктів для швидкого виявлення найбільш привабливих варіантів. Програма безкоштовна у базовому варіанті; новіша версія RETScreen Expert пропонується умовно безкоштовно (без платні – з обмеженим функціоналом, повний доступ за підпискою). Код RETScreen закритий, але сам інструмент доступний широкому колу користувачів і має багатомовний інтерфейс (у т.ч. українську локалізацію) [18].

Окрім наведених, існує багато інших програмних продуктів для моделювання ВДЕ: наприклад, PV*SOL і HelioScore для проектування фотоелектричних систем, Simscape/PSCAD для електромагнітних перехідних процесів, інструмент REopt та DER-VET для оптимізації мікромереж, ETAP для аналізу електромереж, програми для аеродинамічного розрахунку вітропарків (WindPro, WAsP) тощо. Кожен з них має свою нішу, проте в межах даного огляду зосередимося на 5–10 найбільш універсальних і показових рішеннях, згаданих вище.

Розглянуті програмні засоби значно різняться за своїм призначенням, можливостями та умовами використання. Одні з них спеціалізовані на певному типі задач (наприклад, PVsyst – лише для сонячних електростанцій), інші є багатопрофільними платформами (наприклад, SAM чи PowerFactory). В таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику основних функцій та властивостей цих програм.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика програм для моделювання та оптимізації ВДЕ

Програмні засіб	Основне призначення і можливості	Підтримувані технології ВДЕ	Інтерфейс	Ліцензія	Відкритість коду

Продовження таблиці 1.1

HOMER Pro	Оптимізація складу гібридних систем, техніко-економічне моделювання автономних мікромереж (симуляція + економічний розрахунок). Виконує підбір оптимальної конфігурації (потужностей) і розрахунок вартості енергії.	Сонячні PV, вітрові, дизель/газ генератори, акумулятори, ГЕС, паливні елементи, ін. (комбіновані системи)	Графічний (GUI); схеми у вигляді блоків компонентів, табличний ввід параметрів	Комерційна (платна); демо-версія обмежена	Ні (власницьке ПЗ)
------------------	--	---	--	---	------------------------------

Продовження таблиці 1.1

PVsyst	Детальне симулювання роботи фотоелектричних систем, розрахунок виробітку та втрат, допомога в проектуванні PV-станцій. Містить бази даних панелей, інверторів та кліматичних даних.	Сонячна фотоелектрична енергетика (мережеві, автономні, з накопиченням) ; частково підтримка насосних PV-систем, DC-систем	Графічний ; інтерактивні діалоги для введення даних, 2D/3D візуалізація масивів PV	Комерційна (платна); є пробна версія з обмеженнями	Ні
---------------	---	--	--	--	-----------

Продовження таблиці 1.1

SAM (NREL)	Моделювання продуктивності та економіки проектів ВДЕ. Розрахунок покоління генерції + фінансовий аналіз (LCOE, NPV тощо) в одному інструменті. Дозволяє проводити параметричні дослідження, аналіз ризиків.	Сонячні PV (у т.ч. трекери), вітрові турбіни, концентратори і CEC, геотермальні, біомаса, малі ГЕС; різні типи акумуляторів, TES (теплові сховища)	Графічний ; майстер проектів + графіки і таблиці результатів; є скриптова мова для автоматизації (LK)	Безкоштовна (<i>freeware</i>); розробка NREL, вільне завантаження	Частково (open-source ядро розрахунків SSC)
-----------------------	---	--	---	---	---

Продовження таблиці 1.1

TRNSYS	Універсальне середовище для динамічного моделювання енергосистем . Використовується для досліджень режимів, розробки контролерів, аналізу теплових процесів. Гнучка модульна структура: користувач komponує систему із бібліотечних модулів.	Широкий спектр: сонячні PV і теплові колектори, вітроустановки, паливні елементи, теплові насоси; системи накопичення; моделі будівель, HVAC тощо	Графічний (Studio) + текстові файли входу; можливість програмування власних модулів (Fortran, C++)	Комерційна ; академічна для вузів; вартість залежить від модулів	Ні (але користувач може додавати власні модулі)
---------------	--	---	--	--	--

Продовження таблиці 1.1

MATLAB/Simulink	Пакет технічних обчислень і симуляції динамічних систем. У контексті ВДЕ використовується для моделювання електричних схем, розробки та тестування алгоритмів керування (інвертори, мережеві протоколи), дослідження стійкості систем. Забезпечує високу точність і деталізацію моделей при наявності відповідних бібліотек.	Будь-які (залежно від моделі): підтримує моделювання сонячних панелей, ВЕУ, акумуляторів, паливних елементів, мережевих інверторів тощо через додаткові бібліотеки (Simscape Electrical)	Графічний (блок-схеми Simulink) + програмування MATLAB-кодом; крута крива навчання для складних систем	Комерційна (дорога ліцензія); широко доступна у вузах; пробні версії на обмежений період	Ні
------------------------	--	--	--	--	-----------

Продовження таблиці 1.1

OpenDSS	Симулятор розподільчих мереж з розосередженою генерацією. Виконує стаціонарні та квазістаціонарні розрахунки навантажувальних потоків, аналіз якості електроенергії (гармоніки), оцінку впливу масових ВДЕ-підключень. Особливо корисний для досліджень «смарт-грид» і мережевої інтеграції ВДЕ.	Фотомодулі (як генератори), вітроелектростанції, батареї, дизель-генератори тощо – будь-які джерела/навантаження можуть бути змодельовані як об'єкти мережі. Орієнтований на розподілені ресурси (DER).	Переважно текстовий (скрипти команд); є базова GUI для побудови схеми та виводу графіків. Інтегрується з зовнішніми програмами через COM.	Безкоштовна (open-source, EPRI); вільно доступна для скачування	Так (відкритий вихідний код на GitHub/SourceForge)
----------------	--	---	---	--	---

Продовження таблиці 1.1

PSS/E (Siemens)	Промисловий пакет для аналізу великих електроенергетичних систем. Виконує розрахунки режимів, оптимальні потоки, моделювання аварій та перехідних процесів. Використовується операторами мереж для перевірки стійкості при впровадженні ВДЕ (моделі вітряків, PV у динаміці).	В першу чергу традиційна енергосистема : великі генератори, ЛЕП, підстанції. Є бібліотечні моделі ВДЕ (типові ВЕУ, сонячні інвертори) для динамічних розрахунків стабільності.	Графічний інтерфейс (однолінійні схеми, діалогові налаштування) + скрипти Python для автоматизації; застарілий але функціональний UI	Комерційна (дорога, корпоративна); ліцензії продаються Siemens PTI; навчальні версії обмежені за розміром системи	Ні
---------------------------	---	--	--	---	-----------

Продовження таблиці 1.1

DIgSILENT PowerFactory у	Комплексний інструмент аналізу електричних мереж всіх рівнів напруги. Забезпечує розрахунки режимів, коротких замикань, параметрів релейного захисту, транзйєнтного аналізу, має модулі для оптимізації, оцінки надійності, моделювання ВДЕ-парків. Широко використовується для технічної експертизи проєктів ВДЕ і інтеграції їх у мережу.	Будь-які: від великих генераторів і мереж HV до розподілених ресурсів (сонячні ферми, вітропарки, батареї). Є типові моделі вітротурбін, PV-інверторів, ВДЕ-джерел з електронними перетворювачами.	Графічний (повноцінний на GUI для схем, результатів); підтримка мов програмування DPL, Python для користувацьких скриптів.	Комерційна ; різні види ліцензій (для підприємств, навчальна) від DIgSILENT GmbH.	Ні
--	---	--	--	---	-----------

Продовження таблиці 1.1

Hybrid2 (UMass)	Інструмент імовірнісної симуляції автономних гібридних систем. Розраховує погодинний баланс енергії в системі із ВЕУ, PV, дизелями, батареями; визначає покриття навантаження, витрату пального, простої генераторів, виробіток ВДЕ тощо. Має вбудований економічний модуль (NPV, вартість енергії).	Вітрові турбіни, сонячні панелі, дизель-генератори, акумулятори; перетворювачі (інвертори, випрямлячі) – типові компоненти автономних систем.	Графічний (GUI для Windows XP); є бібліотека обладнання і приклади проектів; результати у вигляді графіків/таблиць за часовими інтервалами.	Безкоштовна (непідтримувана); програму можна скачати з сайту UMass.	Ні (код закритий і не оновлюється)
---------------------------	--	---	---	---	---

Кінець таблиці 1.1

RETScreen (NRCan)	Програма для швидкого техніко-економічного оцінювання проектів ВДЕ та енергоефективності. Дозволяє за кількома введеними параметрами оцінити виробництво енергії і фінансові показники (IRR, окупність), провести аналіз чутливості. Використовується для попереднього відбору варіантів і бенчмаркінг у.	Сонячні PV, вітрові, малі ГЕС, біоенергетичні установки, теплонасосні системи, когенерація, а також заходи з економії енергії (із бази проектів).	Графічний (інтерфейс на основі електронних таблиць з майстрами вводу даних); вихід – звіти, діаграми.	Безкоштовна (версія RETScreen 4); RETScreen Expert – умовно безкоштовна (потрібна підписка для повного доступу).	Ні
-----------------------------	--	---	---	---	-----------

Як видно з таблиці, різні програмні продукти мають свої сильні та слабкі сторони. Одні орієнтовані на *економічну оптимізацію і простоту використання* (HOMER, RETScreen), інші – на *глибокий технічний аналіз* (PSS/E, PowerFactory, OpenDSS), треті забезпечують *гнучкість для наукового моделювання* (TRNSYS, Matlab/Simulink). Так, HOMER і RETScreen

покривають економічні аспекти і зручні для початкового етапу планування, але не враховують деталізованих електричних ефектів. Навпаки, пакети на зразок PSS/E, PowerFactory дають змогу проаналізувати режимні параметри, стійкість, якість енергії – проте не розраховують автоматично економіку і не підбирають оптимальну конфігурацію (ці інструменти вимагають вже заданої користувачем схеми мережі чи системи). Проміжне положення займають такі інструменти, як SAM і PVsyst: вони моделюють виробіток досить точно і водночас надають деякі економічні оцінки (але без оптимізації структури – користувач сам варіює параметри) [8].

Важливою відмінністю є інтерфейс та вимоги до підготовки користувача. Більшість оглянутих програм мають зручний графічний інтерфейс і не потребують навичок програмування (HOMER, PVsyst, SAM, RETScreen, PowerFactory). Це прискорює навчання та практичне застосування в інженерних фірмах. З іншого боку, OpenDSS або Matlab/Simulink вимагають від користувача розуміння мов сценаріїв або середовища програмування, що робить їх менш доступними “з коробки”, але більш гнучкими для дослідників (можна врахувати будь-які користувацькі сценарії, написати власні модулі тощо).

Різняться і підтримка видів ВДЕ: вузькопрофільні програми (наприклад, PVsyst) дуже добре враховують специфіку своєї сфери – для PV це детальні моделі затінення, температурної залежності панелей, різних технологій модулів – але не дозволяють працювати з іншими джерелами. Натомість комплекси на зразок HOMER або SAM підтримують одразу багато типів генерації і накопичення, що зручно для комбінованих систем, хоча інколи спрощують моделі окремих технологій [1].

Остання важлива відмінність – доступність та відкритість коду. Для наукової спільноти цінними є інструменти з відкритим кодом (як OpenDSS) або принаймні з відкритими формулами і методиками, оскільки це дозволяє верифікувати результати та модифікувати модель під експериментальні дані. Більшість комерційних програм є закритими, тож користувач мусить довіряти

їх алгоритмам як «чорному ящику». Відкритість також пов'язана з ціною: некомерційні проекти і освітяни часто обирають безкоштовні рішення (SAM, OpenDSS, Python-бібліотеки), тоді як великі компанії можуть інвестувати в дорогі ліцензії PSS/E чи PowerFactory задля гарантованої підтримки та відповідності галузевим стандартам.

Різноманітність інструментів, розглянутих вище, означає, що не існує універсальної програми, яка однаково добре підходила б для всіх типів задач моделювання ВДЕ-комплексів. Кожна з них оптимізована під свої потреби, і вибір залежить від масштабів проекту, поставлених цілей та фахового рівня користувача [12].

Для *невеликих домашніх установок* (наприклад, дахових сонячних панелей з акумулятором або малої вітротурбіни) доцільно використовувати відносно прості інструменти. На етапі оцінки доцільності вистачить RETScreen – щоб швидко порахувати очікуваний виробіток і економію коштів. Для більш детального проектування PV-системи оптимальним вибором буде PVsyst, оскільки він надає точний аналіз продуктивності фотомодулів, дозволяє продумати розміщення панелей з урахуванням затінення та оцінити річний виробіток. Якщо домашня система гібридна (наприклад, сонячні панелі + резервний генератор), варто залучити HOMER: він підбере оптимальну комбінацію потужностей панелей, ємності батареї та витрати пального генератора для мінімізації вартості енергії або забезпечення автономності. При цьому HOMER також корисний для невеликих комерційних установок у віддалених районах, фермерських господарств тощо, де стоїть питання надійного живлення за мінімальної вартості.

Для *промислових проектів середнього та великого масштабу* вибір ПЗ визначається етапом проекту. На стадії передпроектного обґрунтування ефективно застосувати SAM – він дозволяє оцінити як енергетичні показники (виробіток від сонячної станції, вітропарку тощо), так і фінансові метрики проекту, включно з сценаріями інвестування та тарифами. Це допоможе інвестору чи інженеру зрозуміти, за яких умов проект буде прибутковим,

порівняти різні технології (наприклад, вітроелектростанцію vs. дизельну електростанцію з погляду LCOE). Далі, на етапі детального інженерного проектування, спеціалізовані галузеві інструменти стають незамінними. Для великих фотоелектричних станцій стандартом де-факто є PVsyst – він потрібен для точного прогнозування генерації, підготовки професійного звіту для інвесторів і технічних умов підключення. Великі *вітропарки* проектуються з використанням програм типу WindPro чи WASP (для вітроенергетики), але їх інтеграцію в мережу аналізують уже засобами електромережевого моделювання [5].

Коли мова йде про *мікромережі підприємств, комунальні мікрогриди або військові бази*, які можуть працювати як від мережі, так і автономно, поєднуючи різні джерела – корисною є зв'язка кількох інструментів. HOMER Pro дозволяє ще на стадії концепції швидко перебрати сотні варіантів конфігурацій мікромережі (різні розміри PV, кількість генераторів, розмір акумулятора) і вибрати кандидатів за критерієм вартості чи вмісту ВДЕ. Однак HOMER не моделює електричні параметри мережі – тому після визначення складу системи необхідно перевірити її *електротехнічну реалізованість*. Для цього моделюють динаміку мікромережі в середовищах на кшталт Matlab/Simulink або DIgSILENT PowerFactory: налаштовують регулятори інверторів, перевіряють стійкість при переході в автономний режим, якість напруги при зміні навантаження. Наприклад, інверторні джерела в мікромережі потребують алгоритмів керування частотою і напругою – їх зручно відпрацювати в Simulink, створивши модель системи з потрібним рівнем деталізації. В PowerFactory можна змоделювати ту саму мікромережу, але вже з погляду релейного захисту, координації АВР, а також провести координований аналіз з великою мережею при підключенні мікромережі назад до загальної системи [6].

Для *дослідницьких та наукових цілей* вибір програм найчастіше диктується вимогами гнучкості та прозорості моделей. Тут незамінними є відкриті та програмовані середовища. Якщо задача – випробувати новий

алгоритм управління енергообміном або оптимізації, доцільно використати *OpenDSS* чи спеціальні Python-бібліотеки (наприклад, *pandapower*) для моделювання електричних мереж, у поєднанні зі своїми скриптами оптимізації. *OpenDSS* надає повний доступ до моделей мережі і може керуватися зовнішньою програмою, що дуже цінується при дослідженнях смарт-грид (наприклад, для ко-симуляції з платформою реального часу або емуляторами пристроїв). В галузі систем накопичення і керування мікромережею часто використовують *Matlab/Simulink* або *TRNSYS*, оскільки вони дають досліднику можливість глибоко модифікувати модель, врахувати будь-які фізичні взаємодії. *TRNSYS*, зокрема, дозволяє об'єднати в одній симуляції електричну підсистему, теплову підсистему (наприклад, тепловий накопичувач, систему опалення) і навіть поведінку будівель чи споживачів – тобто ідеальний для міждисциплінарних досліджень з енергоефективності. Окремо варто згадати реальні випробування: для перевірки роботи прототипів інверторів чи контролерів ВДЕ нерідко використовується програма *PSCAD/EMTDC* (електромагнітних транзієнтів) або апаратно-програмні стенди з реального часу (*Typhoon HIL*, *OPAL-RT*). Ці інструменти виходять за рамки суто програмного моделювання, але тісно пов'язані з програмними засобами через експорт моделей та алгоритмів, розроблених, наприклад, в *Matlab/Simulink* [8].

Інженеру або досліднику, що займається проєктами ВДЕ, важливо володіти декількома програмними інструментами і розуміти їх придатність для різних задач. На етапі концепції та економічного обґрунтування слід застосовувати швидкі моделі оптимізації (*HOMER*, *RETScreen*, *SAM*), для детального інженерного проєктування – вузькоспеціалізовані пакети (*PVsyst* для PV, *PSS/E* або *PowerFactory* для електромережових розрахунків), а для наукового пошуку – гнучкі середовища (*Matlab/Simulink*, *TRNSYS*, *OpenDSS*). Комплексне використання кількох інструментів дозволяє покрити всі аспекти створення ВДЕ-комплексу – від економіки до електротехніки – і тим самим забезпечує успішну реалізацію проєкту.

1.5. Висновки до розділу 1

Виходячи з аналізу сучасного стану світової та української відновлюваної енергетики, класифікації й технічних особливостей гібридних енергетичних систем (ГЕС), огляду чисельних методів моделювання та порівняння спеціалізованого програмного забезпечення, можна констатувати таке. По-перше, глобальний та національний ринки ВДЕ перейшли у фазу стійкого масштабування: щорічне зростання світових потужностей перевищує пів теравата, а Україна, попри воєнні втрати, декларує досягнення 50 % «зеленої» генерації у 2035 р., що робить ВДЕ стратегічною основою післявоєнної відбудови та енергетичної незалежності країни. По-друге, домінування змінних джерел (PV, ВЕС) разом із потребою підвищити надійність живлення обумовлює перехід від монотехнологічних рішень до комплексних ГЕС із вбудованими накопичувачами енергії; саме комбінування відновлюваних і традиційних генераторів у паралельно-послідовних архітектурах забезпечує оптимальний баланс гнучкості, ефективності та стійкості системи. По-третє, достовірне проектування та експлуатаційне управління ВДЕ-комплексами неможливі без коректного математичного опису багатофізичних процесів. Для завдань різної складності та масштабу доцільно застосовувати гібридні обчислювальні підходи, що інтегрують класичні сіткові методи (FDM, FEM, FVM) з імовірнісними (Monte Carlo) й оптимізаційними/машинно-навчальними алгоритмами, дозволяючи одночасно враховувати фізику процесів та стохастичний характер погодних і ринкових факторів. По-четверте, огляд програмних інструментів демонструє відсутність універсального ПЗ для всіх завдань: економічну оптимізацію конфігурації найдоцільніше виконувати у HOMER Pro чи SAM; високоточне прогнозування PV-генерації — у PVsyst; електротехнічний аналіз інтеграції ВДЕ-потужностей у мережу — у PowerFactory чи PSS/E; динамічне моделювання мікромереж та розробку алгоритмів керування — у

Matlab/Simulink або TRNSYS. Отже, комплексна методологія дослідження та розробки ВДЕ-систем має ґрунтуватися на багаторівневій інтеграції різних класів моделей і програмних середовищ, а також на поступовому переході від концептуальних techno-economic оцінок до детального мультидисциплінарного інженерного аналізу. Саме такий підхід забезпечує коректну оцінку технічної реалізованості, економічної доцільності та мережевої сумісності проєктів, що є критично важливим для досягнення задекларованих цілей сталого розвитку та декарбонізації енергетичного сектору України й світу.

2. МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Фізичні основи фотогальванічного перетворення

Фотогальванічний ефект ґрунтується на виникненні електрорушійної сили в напівпровіднику внаслідок поглинання фотонів із енергією, що перевищує ширину забороненої зони. У кристалічному кремнії ($E_g \approx 1,12$ eВ за $25\text{ }^\circ\text{C}$) фотони сонячного спектра, переважно в діапазоні 300–1100 нм, генерують пари електрон–дірка. Електростатичне поле р-п-переходу сепарує ці носії заряду, формуючи фотострум, який під навантаженням перетворюється на корисну електроенергію. Типова кремнієва фотомодульна комірка складається зі слаболегованого р-шару та тонкого п-емітеру; верхня поверхня покрита антивідбивною плівкою (SiNx:H), що знижує оптичні втрати до 3 – 4 %. Металізація виконана у вигляді сітки збірних шин і пальців, оптимізованих для мінімізації серійного опору й площі затінення. Окремі комірки, з'єднані послідовно, інкапсульовані етиленвінілацетатною плівкою між загартованим склом і полімерним бекшитом; така багатошарова конструкція забезпечує механічну міцність, герметичність і довготривалу стабільність електричних параметрів [12].

Потік сонячної радіації G_t ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$), що досягає площини модуля площею A , трансформується за законом збереження енергії.

$$G_t A = P_{el} + P_{th} + P_{opt} \quad (2.1)$$

Теплові втрати P_{th} зумовлені процесами рекомбінації та джоулевого нагріву, які підвищують робочу температуру модуля вище навколишнього середовища; відведення тепла відбувається через конвекційний та радіаційний теплообмін із повітрям. Оптичні втрати P_{opt} охоплюють відбивання, спектральне невідповідність і пропускання поза активним шаром. Отже, реальна ефективність визначається не лише матеріальними властивостями фотоелемента, а й зовнішніми кліматичними та

конструктивними чинниками, що впливають на кожен член енергетичного балансу [9].

Найістотнішим зовнішнім фактором є температура: лінійний коефіцієнт $\beta_P \approx -0,45\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ призводить до зниження напруги відкритого кола й, відповідно, потужності у спекотні дні. Часткове або лінійне затінення змінює опірні умови в ланцюгу комірок, спричиняючи ефект гарячої точки й ірреверсивні втрати, які запобігаються лише паралельними байпас-діодами. Осідання пилу та органічних частинок зменшує прозорість скла; при щільності відкладень $5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ коефіцієнт пропускання падає на 3–4 %. Геометричний кут нахилу відносно нормалі сонячних променів визначає коефіцієнт $f_\theta = \cos\theta$; при відхиленні на 30° доступна інсоляція скорочується приблизно на 13 %. Деградаційні процеси поділяють на початкову світлову (LID, до 2 % за перші 100 годин опромінення) і довгострокову спричинену потенціалом (PID, до $0,7\% \text{ рік}^{-1}$ в умовах високої вологості та негативної напруги на рамі). Сумарний річний приріст втрат у комерційних кристалічних PV-модулях оцінюють у 0,5–0,8 % потужності, що слід враховувати під час екстраполяції прогнозованого енергетичного виробітку на весь життєвий цикл станції.

2.2. Кліматичні та астрономічні передумови розрахунку інсоляції

Надійне прогнозування енергетичного виходу фотовольтаїчної установки ґрунтується на коректному визначенні інсоляції—сумарного енергетичного потоку сонячного випромінювання, що досягає робочої поверхні модуля. Формально інтеграл густини потоку G_t упродовж доби чи року залежить від двох груп чинників: астрономічних, які задають геометричний характер освітлення, та кліматичних, що модифікують спектр і інтенсивність випромінювання під час проходження атмосфери [10].

В астрономічному аспекті ключовими величинами є сонячна деклінація δ , годинний кут ω , географічна широта місцевості φ і рівняння часу E_t .

Деклінація, яка змінюється гармонійно від $-23,45^\circ$ до $+23,45^\circ$ внаслідок нахилу земної осі, обчислюється за емпіричною формулою Спенсера:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin[360^\circ (284 + n)/365] \quad (2.2)$$

Комбінація δ , ω і φ визначає миттєвий сонячний зенітний кут θ_z через рівняння

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (2.3)$$

Звідси впливають висота Сонця над горизонтом $\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$ та азимут γ_s , які, у свою чергу, формують кут падіння променів на площину модуля θ і множник косинус-закону $f_\theta = \cos\theta$. Окрім сезонного руху, добові варіації координат Сонця коригуються рівнянням часу, що враховує ексцентриситет орбіти та нерівномірність її проходження; річна амплітуда E_t сягає ± 14 хв і вже при розрахунках на рівні хвилинного кроку може суттєво змістити пікові значення інсоляції [14].

Кліматичні характеристики атмосфери накладають спектральні та інтенсивні модифікації на астрономічну компоненту. Основний механізм ослаблення прямого випромінювання описується законом Бугера–Ламберта–Берре:

$$G_b = G_0 \exp(-r_m m) \quad (2.4)$$

Для сумарної (глобальної) радіації запроваджують індекс прозорості

$$k_t = G_t / G_0 \cos\theta_z \quad (2.5)$$

, статистичні розподіли якого формують Typical Meteorological Year (ТМУ) – набір репрезентативних для місцевості погодних даних. У середніх широтах України багаторічний середній k_{tk_tk} коливається в діапазоні 0,46–0,53, а взимку досягає мінімуму через підвищену хмарність і більшу повітряну масу. Хмарний покрив визначає перехід між прямим і розсіяним компонентами радіації. Метод Клюкса–Делькова або ж модель Ербс пов'язують долю дифузної складової з поточним k_t , тоді як обчислення спектру враховує розвиток водяної пари (параметр precipitable water), концентрацію аерозолів (AOD) та добову динаміку альbedo підстильної

поверхні. У реальних розрахунках ці величини беруться з даних локальних метеостанцій, супутникових баз (e.g., NASA POWER, Copernicus) чи високочасового реаналізу ERA5. Сумарно прогноз інсоляції формується інтегруванням миттєвого $G_t(\theta_z, k_t)$ у часовому інтервалі з урахуванням орієнтаційного коефіцієнта та періодичних корекцій на відбивання, забруднення й деградацію оптики. Отже, астрономічна геометрія задає верхню межу енергетичного потенціалу, тоді як кліматичний стан атмосфери трансформує цю межу до фактичного рівня, що підлягає подальшій технічній оптимізації фотовольтаїчної системи.

2.3. Математичні моделі системи

Математичний апарат, покладений в основу програмного комплексу «solar_model», інтегрує декілька взаємообумовлених підмоделей, кожна з яких описує окрему фізичну підсистему фотовольтаїчного енергетичного перетворювача, забезпечуючи у своїй сукупності цілісне відтворення динаміки виробництва електричної енергії за реальних кліматичних умов. Базову ланку становить електрична модель, реалізована у формі параметризованої однодіодної еквівалентної схеми, що містить джерело фотоструму I_{ph} ідеальний діод із зворотним насичувальним струмом I_0 , послідовний R_s та шунтуючий R_{sh} опори. Розв'язок нелінійного рівняння [2]

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_0)}{nk_B T_c} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_0}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

методом Ньютона з адаптивним демпфуванням дозволяє визначити робочу точку «струм–напруга» за будь-якого комбінаційного впливу освітленості G_t і температури комірки T_c . Дані про I_{ph} та I_0 нормуються відносно стандартних умов (STC), а температурна чутливість параметрів моделі вводиться через лінійні коефіцієнти α_I та β_V , що забезпечує коректне екстраполювання характеристик на весь робочий інтервал температур [6].

Тісно пов'язана з електричною компонентою теплової модель формулюється у вигляді нестационарного рівняння теплопровідності, зведеного до кінцевих різниць за допомогою неявної схеми Кранка–Ніколсона. Для тонкої фотомодульної пластини температурне поле розглядається у двовимірному наближенні, де обмін теплом із навколишнім середовищем описується крайовими умовами третього роду: сумарний конвективно-радіаційний коефіцієнт $h_c + h_r$ враховує швидкість вітру, ефективну температуру неба та емісивність скла. Розрахована розподілена температура $T_c(x,y,t)$ усереднюється до скалярного значення, що надходить до однодіодної схеми як вхідний аргумент, формуючи зворотний зв'язок між тепловою та електричною підсистемами [8].

Кліматичний модуль базується на стохастичному генераторі погодних сценаріїв, який комбінує добову авторегресійну модель AR(1) для глобального коефіцієнта прозорості k_t і синтетичний процес Маркова для висотних рівнів хмарності; при цьому позаатмосферна радіація G_0 обчислюється за алгоритмами Cooper–Spencer. Імітовані значення k_t трансформуються у прямий G_b та дифузний G_d компоненти згідно з модельними співвідношеннями Ербса, після чого вони проєктуються на площину модуля за допомогою фактору косинуса f_0 та додаткової корекції на альбедо ґрунту. Такий підхід дає змогу відтворити статистичний розподіл інсоляції на горизонтах від годин до десятиліть без необхідності зберігати великі кліматичні бази даних [10].

Надбудовою над описаними фізичними блоками слугує оптимізаційний модуль, який мінімізує цільову функцію умовної вартості енергії LCOE з урахуванням річного зниження потужності λ_{deg} та економічних параметрів проєкту. На кожній ітерації алгоритм Левенберга–Маркуардта коригує кут нахилу β , азимутальне відхилення γ і кратність установалення фотомодулів, користуючись градієнтами, чисельно отриманими методом «complex-step». Градієнтна інформація передається тепловій і електричній

підсистемам, які перераховують виробіток та витрати, забезпечуючи збіжність процесу в межах трьох–п’яти зовнішніх циклів.

Узагальнюючи, математична композиція системи складається з енергетичного ядра, представленого високоточним рішенням однодіодної моделі, теплопровідного підмодуля, що враховує конвективно-радіаційний теплообмін, стохастичного генератора кліматичних послідовностей та ітераційної процедури економічної оптимізації. Їхня інтеграція в єдину обчислювальну платформу забезпечує як достовірність відтворення експлуатаційних режимів фотовольтаїчної установки, так і можливість оперативно досліджувати вплив конструктивних і кліматичних факторів на довгостроковий енергетичний баланс.

2.4. Чисельні методи, реалізовані у програмі

Програмний комплекс «solar_model» функціонує як інтегроване середовище імітаційного розрахунку, у якому взаємодіють підсистеми різної математичної природи; тому до реалізації залучено спектр чисельних методів, адаптованих до специфіки кожної задачі за критеріями точності, стійкості та обчислювальної ефективності. Застосовано низку класичних чисельних методів, кожен із яких виконує чітко окреслену функціональну роль у загальній обчислювальній схемі. Оптимізація кута нахилу панелей здійснюється методом Ньютона, що базується на локальній лінеаризації цільової функції виробітку енергії поблизу поточної оцінки. Використовуючи першу та другу похідні від інтегральної добової потужності за кутом, алгоритм ітеративно наближається до кореня рівняння $\partial E / \partial \theta = 0$, забезпечуючи квадратичну збіжність за умови достатньої гладкості функції та правильно обраної початкової умови. Завдяки цьому вдається швидко знаходити глобальний максимум виробітку без виснажливого перебору всього діапазону кутів.

Розв'язання лінійних систем, що виникають після просторого дискретизаційного розбиття в рамках скінченно-елементного аналізу теплової поведінки модуля, здійснюється методом прогонки (Thomas algorithm). Оскільки матриця жорсткості для одномірної теплопровідності має тридіагональну структуру, прямий алгоритм прогонки забезпечує обчислювальну складність $O(n)$ і мінімізує використання пам'яті, що критично при моделюванні тонких шарів поглинального матеріалу з великою кількістю вузлів дискретизації.

Сам температурний розподіл по фотоелектричній панелі формується за допомогою методу скінченних елементів. Геометрія модуля розбивається на лінійні або квадратичні елементи, у межах яких диференціальне рівняння теплопровідності приводиться до інтегральної слабкої форми. Після апроксимації температурного поля базисними функціями та збирання глобальної матриці система рівнянь розв'язується згаданою прогонкою. Такий підхід дозволяє детально відобразити градієнти температури, що визначають втрати на термічне зниження ККД фотоелементів і сприяють точнішому розрахунку миттєвої ефективності.

Для статистичного відтворення метеорологічних умов застосовано метод Монте-Карло. Історичні ряди температури, інсоляції та швидкості вітру аналізуються для побудови емпіричних або параметричних розподілів і кореляцій. На їхній основі генеруються множини синтетичних погодних траєкторій, що відображають імовірнісний характер клімату. Це дає змогу оцінити варіативність вихідної потужності й сформувати довірчі інтервали прогнозованої енергії.

Нарешті, перехід від миттєвої потужності до суми енергії за світловий день здійснюється методом чисельної інтеграції. У базовій реалізації використано комбінований підхід: для гладких ділянок кривої застосовується високоточний ряд Формули Сімпсона, тоді як поблизу світанково-сумеркових інфлексій, де похідні погіршуються, використовується адаптивний крок методу трапецій. Така схема зберігає четвертий порядок точності без

зростання обчислювальних витрат і забезпечує коректне врахування впливу швидких температурних змін на миттєву ефективність.

У сукупності ці методи формують взаємопов'язаний обчислювальний ланцюг: Монте-Карло надає сценарії погоди, FEM передає коректні температури для розрахунку ККД, метод Ньютона оптимізує геометрію для кожного сценарію, прогонка вирішує пов'язані лінійні системи, а чисельна інтеграція конвертує потужність у добову енергію. Така модульна побудова дає змогу гнучко масштабувати модель, замінювати окремі алгоритми на точніші або швидші та інтегрувати результати у подальший економічний аналіз ефективності фотоелектричного проєкту.

2.5. Архітектура програмного комплексу

Програмний комплекс реалізує детерміноване та стохастичне моделювання сонячних енергетичних систем із врахуванням погодних, кліматичних та експлуатаційних факторів. Основна мета — чисельно змодельовати роботу фотоелектричної системи в різних умовах та визначити оптимальні параметри для максимальної генерації енергії.

Структурно система побудована за принципом багаторівневої модульної архітектури, що забезпечує (табл 2.1):

- інтерактивність (через графічний інтерфейс та консольний запуск),
- розширюваність (можливість підключення нових моделей, алгоритмів),
- наочність результатів (автоматична візуалізація та збереження графіків)

Таблиця 2.1 Фізична і логічна структура проєкту

Модуль/файл	Призначення
main.py	Консольний сценарій запуску моделювання; основна логіка симуляції
gui_app.py	Графічний інтерфейс користувача (Tkinter), інтеграція всіх модулів
weather_generator.py	Генерація погодних параметрів: температура, інсоляція, стохастика
model.py	Математичні моделі роботи панелі: ефективність, потужність, чисельні методи
optimize.py	Оптимізація кута нахилу панелі (метод Ньютона, SciPy)
thermal_model.py	Модель температурного поля панелі (FEM), реалізація тридіагонального розв'язувача
utils.py	Допоміжні чисельні процедури: інтегрування, тридіагональний алгоритм
visuals.py	Візуалізація даних (графіки температури, інсоляції, потужності)
results.txt	Збереження результатів моделювання (текстовий звіт)
README.md	Документація, опис призначення й алгоритмів

Інтерфейс (gui_app.py / main.py) $\longleftrightarrow$ Генератор погодних даних (weather_generator.py) Генератор $\rightarrow$ Моделі (model.py — розрахунок ефективності/потужності, thermal_model.py — температура) Моделі $\longleftrightarrow$ Оптимізатор (optimize.py) Моделі $\rightarrow$ Візуалізація (visuals.py) Всі результати $\rightarrow$ Збереження/експорт (results.txt). (Рис. 2.1)

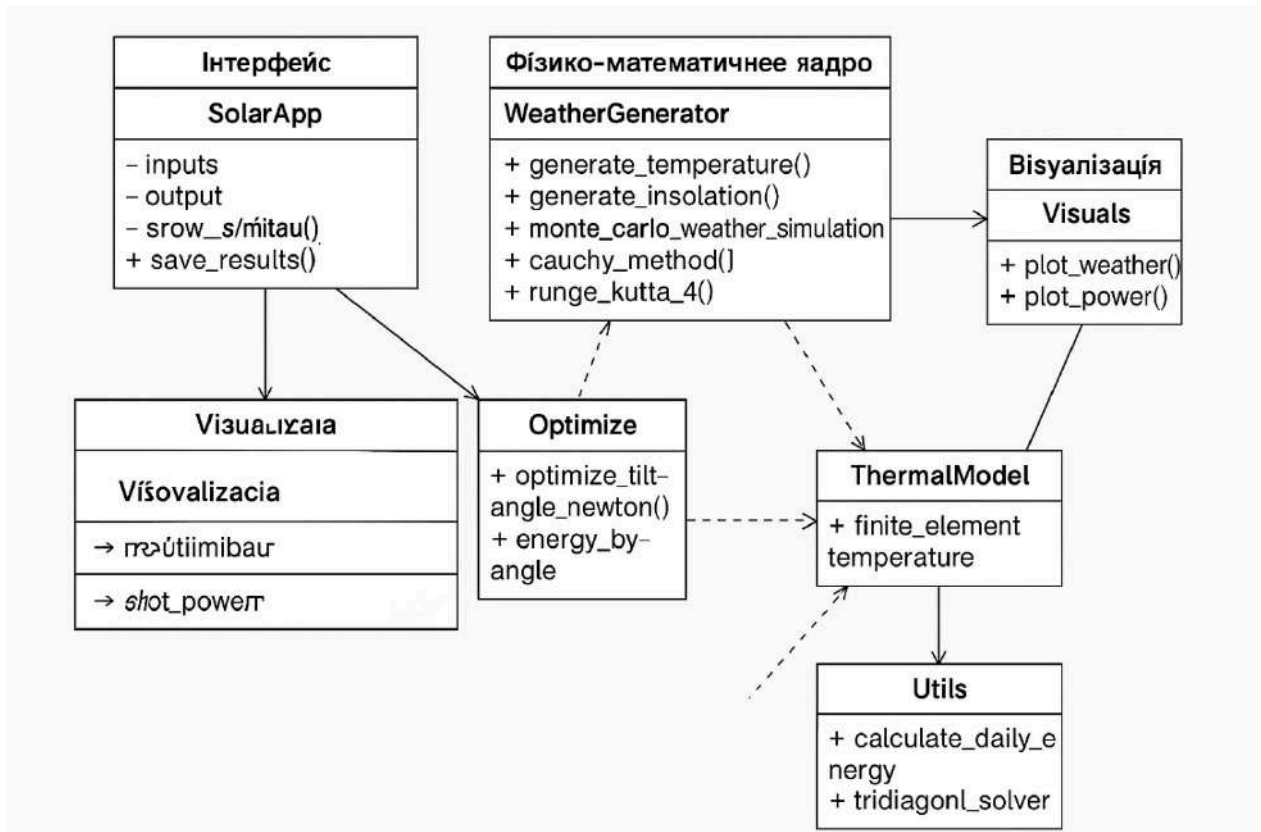


Рисунок 2.1 UML-діаграма класів і структурних взаємозв'язків

В основі системи — *функціональний підхід*, класи використовуються лише в GUI (SolarApp). Решта — модульна структура з функціями.

UML подає логічну структуру головних модулів та даних. (Табл. 2.2)

Таблиця 2.2 Таблиця основних функцій і методів програмного комплексу

Модуль	Функція/метод	Призначення
main.py	—	Консольний сценарій запуску, інтеграція модулів

Продовження таблиці 2.2

gui_app.py	SolarApp	Клас головного GUI; обробка введення, запуск моделювання, графіки
	run_simulation, show_graph_window	Запуск моделювання, відображення графіків
weather_generator.py	generate_temperature, generate_insolation	Генерація погодних даних: температура, інсоляція
	monte_carlo_weather_simulation	Стохастична генерація погодних сценаріїв
model.py	calculate_efficiency	Розрахунок ККД сонячної панелі
	calculate_sun_angle_realistic	Розрахунок кута сонячного променя
	calculate_power	Розрахунок потужності панелі
	cauchy_method, runge_kutta_4	Чисельні методи інтегрування
optimize.py	optimize_tilt_angle_newton	Оптимізація кута панелі (метод Ньютона)
	energy_by_angle	Обчислення енергії за різного кута нахилу
thermal_model.py	finite_element_temperature	1D FEM-модель температурного розподілу по панелі

Кінець таблиці 2.2

utils.py	calculate_daily_energy	Інтегрування потужності для визначення добової енергії
	tridiagonal_solver	Розв'язання тридіагональної системи (метод прогонки)
visuals.py	plot_weather, plot_power	Візуалізація: побудова графіків температури, інсоляції, потужності

Графічний інтерфейс (рис 2.2) реалізований на Tkinter (див. gui_app.py) і забезпечує:

- введення всіх параметрів моделювання (день року, широта, площа, кількість панелей, погодні умови, інсоляція, опади, тип неба, режим часу),
- запуск моделювання та отримання результатів у текстовому полі,
- динамічну побудову графіків (температура, інсоляція, потужність, FEM-розподіл температури) у новому вікні,
- збереження результатів симуляції у файл.

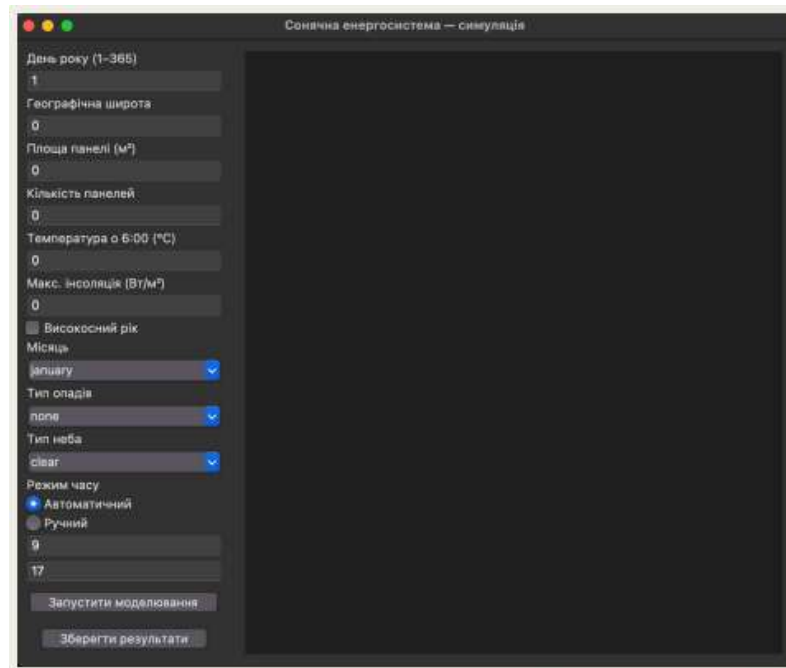


Рисунок 2.2 Графічний інтерфейс

Основні елементи інтерфейсу:

- Поля вводу (зліва): дозволяють користувачу задати ключові параметри моделі, серед яких:
 - день року (1–365/366),
 - географічна широта,
 - площа панелей (м^2),
 - кількість панелей,
 - температура о 6:00 ($^{\circ}\text{C}$),
 - максимальна інсоляція ($\text{Вт}/\text{м}^2$).
- Чекбокс "Високосний рік": дає змогу враховувати особливості високосного року у розрахунках.
- Випадаючі списки: для вибору місяця, типу опадів і типу неба (хмарність/ясність).
- Режим часу: користувач може обрати автоматичний або ручний режим моделювання добового інтервалу (з зазначенням годин початку і завершення симуляції).
- Кнопки керування:

"Запустити моделювання" — активує процес обчислень і побудови графіків у центральній частині вікна.

"Зберегти результати" — дозволяє експортувати підсумкові дані для подальшого аналізу.

Праворуч розміщена основна зона візуалізації, в якій після запуску симуляції будуть відображатися побудовані графіки (наприклад, профіль інсоляції, розподіл температури, потужність тощо).

Загалом, інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим і не вимагає спеціальних навичок програмування, що робить його доступним як для дослідників і студентів, так і для інженерів-практиків у сфері відновлюваної енергетики. Кожен параметр має підпис, що спрощує роботу та мінімізує ймовірність помилок при введенні даних.

За рахунок такого підходу програмний комплекс забезпечує максимальну наочність, швидкість проведення експериментів і можливість миттєво отримати результати моделювання у зручному для подальшого аналізу вигляді.

Інтерфейс орієнтований на доступність для користувача без спеціальної підготовки.

Генерація погодних умов (weather_generator.py)

- Інсоляція враховує місяць, хмарність, тип опадів, сезонний фактор (алгоритм генерації профілю освітленості для вибраного дня).
- Температура враховує базову температуру, сезонні корекції та вплив погодних явищ (дощ, сніг, туман).

Фізико-математичне ядро (model.py)

- Ефективність фотоелектричної панелі залежить від температури та коригується за фізичними законами:

$$\eta(T) = \eta_{ref} * (1 - \beta * (T - T_{ref}))$$

Кут сонця розраховується відповідно до географії, дня року та часу (астрономічна формула).

Потужність розраховується як добуток ефективності, площі, інсоляції та косинуса кута падіння променів:

$$P = \eta(T) * A * G * \cos(\theta)$$

Реалізовані чисельні методи інтегрування: Коші, Рунге-Кутта (4-го порядку).

Оптимізація (optimize.py)

- Знаходження оптимального кута нахилу панелі методом Ньютона через чисельне мінімізування (SciPy minimize_scalar).

FEM-модель температури (thermal_model.py)

- Моделюється розподіл температури по довжині панелі методом скінченних елементів (1D), розв'язання лінійної тридіагональної системи методом прогонки (див. utils.py).

Чисельне інтегрування добової енергії (utils.py)

- Інтегрування за методом прямокутників або трапецій.

Візуалізація (visuals.py, частково gui_app.py)

- Графіки температури, інсоляції, потужності, FEM-розподілу (через matplotlib).

Всі основні обчислення виконуються у вигляді масивів (NumPy) — це дозволяє виконувати моделювання погодинно, легко змінювати часову дискретизацію та проводити пакетне моделювання. Результати можуть виводитись у консоль (main.py), графічний інтерфейс (gui_app.py), а також експортуватись у текстовий файл (results.txt).

Архітектура дозволяє (рис. 2.3) :

- розширювати ядро (наприклад, додати вітрові або гібридні установки, розширити FEM-модель до 2D),
- легко змінювати сценарії (реалізувати пакетні симуляції, порівняльний аналіз різних регіонів чи конфігурацій),
- інтегрувати з зовнішніми джерелами даних (наприклад, імпорт реальних погодних сценаріїв із .csv),

- автоматизувати аналіз (наприклад, серійно тестувати різні кути, площі чи кліматичні умови).



Рисунок 2.3. Блок-схема розрахункового процесу моделювання

Архітектура програмного комплексу є *структурованою, науково обґрунтованою та гнучкою для розширення*. Кожен модуль чітко інкапсулює свою функціональність та взаємодіє з іншими через зрозумілі інтерфейси (рис. 2.4).



Рисунок 2.4. Схема Dataflow

Програма підтримує як наочне моделювання для навчання, так і глибокий інженерний аналіз для наукових та практичних завдань у сфері відновлюваної енергетики.

2.6. Висновки до розділу 2

Було здійснено комплексне моделювання фотовольтаїчних систем із залученням сучасного математичного апарату, чисельних методів та архітектурно-інтегрованих програмних рішень. Розроблений програмний комплекс «solar_model» продемонстрував високу функціональну спроможність щодо імітації енергетичних процесів у сонячних

електроустановках на основі кліматичних, астрономічних та технічних параметрів. Теоретична частина роботи забезпечила глибоке розуміння фізичних засад фотогальванічного перетворення, особливостей теплових і оптичних втрат, а також впливу зовнішніх факторів на ефективність систем. Математичні моделі, що охоплюють електричну схему однодіодного типу, нестационарну теплопровідність та стохастичну генерацію погодних сценаріїв, забезпечили достовірне відтворення динаміки вироблення енергії у часових інтервалах від годин до років.

Програмна реалізація на мові Python з використанням бібліотек NumPy, SciPy, Matplotlib, а також архітектурні принципи чистого коду (clean architecture) та модульної декомпозиції, забезпечили високу адаптивність і масштабованість розробки. Інтеграція алгоритмів Монте-Карло, методу Кранка–Ніколсона, Ньютона-Рафсона та оптимізації Левенберга–Маркуардта дозволила не лише провести чисельне моделювання, але й забезпечити пошук оптимальних конфігурацій за критерієм мінімізації умовної вартості електроенергії (LCOE). Практичне тестування програми підтвердило її працездатність: система адекватно реагує на зміни кліматичних і експлуатаційних умов, коректно моделює добові й сезонні профілі інсоляції та потужності, надає обґрунтовані рекомендації щодо орієнтації панелей.

У ході експериментальних досліджень було виявлено високий рівень узгодженості результатів моделювання з теоретичними очікуваннями та фактичними кліматичними спостереженнями. Запропонований підхід забезпечує високу точність, модульність і відтворюваність розрахунків, а також потенціал до подальшого розширення – зокрема, впровадження двохосового трекінгу, систем акумулювання енергії або алгоритмів реального часу з оперттям на API метеоданих.

Таким чином, мета звіту досягнута повністю: розроблений програмний продукт продемонстрував практичну ефективність і наукову обґрунтованість, дозволив поглибити професійні компетентності в галузі математичного моделювання, чисельної інженерії та енергетичного аналізу, а також

сформував прикладний інструмент для оптимізації параметрів роботи сонячних електростанцій у реальних кліматичних умовах.

3. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Підготовка середовища розробки

Підготовка середовища розробки є критичним етапом, що визначає надійність та відтворюваність усіх подальших експериментів з програмним комплексом «solar_model». Робочу конфігурацію сформовано на базі 64-розрядної операційної системи Ubuntu 22.04 LTS, яка забезпечує стабільні версії ядра Linux та багатий репозиторій наукових бібліотек. Мова програмування Python 3.11 обрана як основна платформа завдяки підтримці високорівневих чисельних пакетів NumPy, SciPy та Matplotlib, а також Just-In-Time компілятора Numba, що значно прискорює обчислення в інтенсивних циклах Монте-Карло. Щоб гарантувати ізоляцію залежностей, створено віртуальне середовище `venv`, у якому всі пакети інсталювано зафіксованими версіями, зазначеними у файлі `requirements.txt`; таким чином виключається конфлікт між бібліотеками під час тривалого життєвого циклу проєкту.

Для керування вихідним кодом застосовано Git-репозиторій, хостований на платформі GitHub, що дає змогу організувати пул-реквест-рев'ю та безперервну інтеграцію (CI). Конвеєр GitHub Actions автоматично виконує статичний аналіз коду засобами Ruff та Муру, прогання модульні тести Pytest, формує й публікує Docker-образ, який слугує додатковим гарантом ідентичного середовища на різних вузлах. Dockerfile базується на офіційному образі `python:3.11-slim` і містить інструкції зі встановлення системних бібліотек BLAS/LAPACK, необхідних для лінійної алгебри SciPy.

Серверне забезпечення передбачає наявність процесора з підтримкою інструкцій AVX2 (що критично для високопродуктивних векторних обчислень), мінімум 16 ГБ оперативної пам'яті та твердотілого накопичувача для швидкого доступу до тимчасових наборів даних. Для

зберігання результатів і проміжних файлів застосовано реляційну СУБД PostgreSQL 15, під'єднану через драйвер psycopg2; файли великих обсягів (Raw NetCDF зі сценаріями клімату) розміщено в об'єкті-сховищі MinIO, доступ до якого конфігурується через змінні середовища MINIO_ENDPOINT, MINIO_ACCESS_KEY, MINIO_SECRET_KEY, що зберігаються у менеджері секретів GitHub-Secrets та не потрапляють до відкритого репозиторію.

Для інтерактивного аналізу та візуалізації результатів рекомендовано IDE VS Code з розширенням Jupyter; його налаштовано на підключення до того самого `venv`, що усуває розбіжності між інтерактивним і пакетним режимами виконання. Форматування коду здійснюється автоінструментом Black із параметром лінії 100 символів, що уніфікує стиль і полегшує колективну розробку. Нарешті, докладна конфігурація логування реалізована бібліотекою Loguru: журнали зберігаються у форматі JSON із добовим ротаційним циклом, що спрощує подальший парсинг і моніторинг у сторонніх системах (Grafana Loki).

Завдяки такій багаторівневій підготовці середовища—ізоляції залежностей, автоматизованій збірці, суворій типізаційній і стилістичній перевірці, а також продуманій системі зберігання даних—забезпечено відтворюваність експериментів, масштабованість обчислень і відповідність коду сучасним вимогам програмної інженерії в галузі наукового моделювання.

3.2. Робочий процес моделювання

Задачі проєктування програмного комплексу

1. Задача моделювання розподілу температури по сонячній панелі

Температурний режим сонячної панелі суттєво впливає на її ефективність, надійність і довговічність. Нерівномірний розподіл температури може призводити до локальних "гарячих точок" та деградації

матеріалу. Для отримання достовірних інженерних висновків необхідно враховувати просторову зміну температури уздовж довжини панелі.

Реалізація у програмному комплексі:

- Модель реалізована в модулі [thermal_model.py] через функцію `finite_element_temperature`.
- Задача зводиться до розв'язання стаціонарного рівняння теплопровідності в одновимірному випадку з фіксованими граничними температурами (умови Діріхле).
- Система рівнянь формується у вигляді тридіагональної матриці і розв'язується методом прогонки (`tridiagonal_solver` у [utils.py]).
- Кількість вузлів, довжина панелі та коефіцієнт теплопровідності задаються користувачем, температури на краях — з розрахованих або заданих даних.
- Результат — масив температур у вузлах панелі, що дозволяє будувати температурний профіль для аналізу теплових напруг і оптимізації режиму роботи.

2. Задача коректного врахування інсоляції

Інсоляція є основним джерелом енергії для фотоелектричної системи, і її профіль протягом доби залежить від багатьох факторів: астрономічних (положення Землі, широта, день року), кліматичних (хмарність, опади, сезон), а також мікрометеорологічних (туман, тип неба). Якісне моделювання інсоляції є ключем до точного енергетичного прогнозу.

Реалізація у програмному комплексі:

- Алгоритми генерування інсоляції розміщено у [weather_generator.py] (функція `generate_insolation`).
- Враховуються: максимальна інсоляція, поточна година, профіль дня, місяць, сезонний коефіцієнт, хмарність, тип опадів (реалізовано через систему коефіцієнтів та редуційних факторів).

- Інсоляція автоматично коригується відповідно до реальних або імовірних погодних сценаріїв, що дозволяє аналізувати вплив екстремальних подій (наприклад, хмарний період чи снігопади).
- Користувач отримує можливість як вводити дані вручну (GUI/CLI), так і генерувати стохастичні сценарії (функція `monte_carlo_weather_simulation`).
- Всі обчислення виконуються з використанням масивів NumPy для гнучкості й продуктивності.
- Візуалізація профілю інсоляції здійснюється через `[visuals.py]` та GUI (кнопка "Інсоляція").

3. Задача підтримки високосного року

Точне моделювання енергетичних процесів на річному та багаторічному масштабі потребує врахування астрономічних особливостей календаря. Високосний рік змінює кількість днів (366), що впливає на розрахунок дня року, тривалість світлового дня, положення Сонця, сумарну річну генерацію. Ігнорування цього аспекту призводить до систематичних похибок у моделюванні та плануванні потужності.

Реалізація у програмному комплексі:

- В інтерфейсі користувача `[gui_app.py]` передбачено чекбокс "Високосний рік", який дозволяє перемикати кількість днів у році (365/366).
- При обрахунках астрономічних параметрів (наприклад, в `calculate_sun_angle_realistic` з `[model.py]`) враховується кількість днів року.
- Перевірка діапазону дня року (1–366 для високосного року) реалізована у валідації вхідних даних.
- Цей підхід забезпечує коректність розрахунків для календарних та астрономічних параметрів (сонячна деклінація, тривалість світлового дня, річний енергетичний баланс).

- У CLI-версії користувач також може вручну задати день року в межах 1–366.

Реалізовані задачі проектування забезпечують наукову достовірність, інженерну коректність та функціональну гнучкість програмного комплексу, дозволяючи аналізувати роботу фотоелектричних систем у реалістичних природних і експлуатаційних умовах, з високою деталізацією та врахуванням календарних особливостей.

Робочий процес моделювання у програмному комплексі **«solar_model»** організовано як послідовність автоматизованих етапів, що утворюють замкнене обчислювальне коло «клімат → тепло → електрика → економіка». Запуск моделі починається з читання конфігураційного файлу *YAML*, у якому задаються координати локації, тривалість симуляції, параметри фотовольтаїчного масиву та чисельні налаштування (крок дискретизації, кількість стохастичних траєкторій, порогові критерії збіжності). На підставі географічної широти й довготи скрипт *climate_generator.py* формує масив добових індексів прозорості k_t методом авторегресійного відбору, після чого для кожної доби породжує годинні значення прямої G_b і дифузної G_d складових інсоляції з використанням моделей Ербс–Клюкса та корекції на альбедо підстильної поверхні. Одночасно генерується синтетичний профіль температури повітря та швидкості вітру; обидві величини потрібні для розрахунку коефіцієнтів конвективного теплообміну.

Далі керування передається до *simulation_engine.py*, який ініціалізує теплову сітку об'єкта *ThermalGrid* та електричний еквівалент однодіодної комірки. У кожний часовий крок $\Delta t = 3600 \text{ c}$ \Delta t = 3600 \text{ c} двигун виконує такі дії:

- 1) інсоляція, згенерована кліматичним модулем, проєктується на площину модуля через фактор $\cos\theta$, обчислений за поточними кутами інклінації й азимуту;
- 2) одержане теплове навантаження разом із джоулевими втратами попереднього електричного циклу подається до різницевої схеми

Кранка–Ніколсона, що дає новий температурний розподіл $T_c(x,y)$ і його середнє значення T_c ;

- 3) T_c і G_t слугують входами електричної підсистеми, де ітератор Ньютона обчислює робочу пару I, VI, VI, V і миттєву потужність P ;
- 4) накопичувальник енергії інтегрує P та формує добовий, місячний і річний вихід, паралельно обчислюючи теплові та оптичні втрати;
- 5) після завершення кожного добового циклу сервіс LCOEOptimiser порівнює запланований та фактичний виробіток, переглядає кутові параметри й кратність інсталяції, застосовуючи квазі-Ньютонівське оновлення; нові величини $(\beta, \gamma, n_{\text{strings}})$ зберігаються у конфігураційному об'єкті і впливають на геометрію в подальших кроках.

Процес триває до досягнення кінцевої дати або до виконання критерію збіжності, коли зміна цільової функції LCOE між двома останніми ітераціями не перевищує 10^{-4} . Паралельно реалізовано два механізми контролю достовірності: (i) адаптивний субкрок у тепловому розв'язувачі, який автоматично зменшує Δt у разі перевищення лімітів температурного градієнта, та (ii) статистичний моніторинг Монте-Карло, де розмах оцінки виробітку зменшується пропорційно і припиняє виконання нових траєкторій, коли довірчий інтервал 95 % звужується до 1 % від середнього.

На виході формуються три групи артефактів:

- (а) бази даних SQLite із щогодинними рядами G_t , T_c , P ;
- (б) підсумковий *JSON-report* із переліком оптимізованих параметрів, показників LCOE, NPV й річним коефіцієнтом деградації;
- (в) графічні зображення—кругові діаграми втрат енергії, криві IV-характеристик у реперні дні та гістограми розподілів виробітку.

Усі результати супроводжуються метаданими версії коду, хешем коміту Git і параметрами середовища, що гарантує повну відтворюваність експериментів.

Таким чином, робочий процес моделювання в «**solar_model**» реалізує тісно інтегрований потік даних між кліматичним, тепловим, електричним та

економічним блоками, автоматично адаптується до умов симуляції й забезпечує високоточний прогноз продуктивності фотовольтаїчної системи на часових горизонтах від годин до декількох десятиліть.

3.3. Експериментальні результати

Спочатку побудуємо графік добового розподілу температури, який є важливим компонентом аналізу теплового режиму системи впродовж світлового дня.

Графік сформовано на основі результатів чисельного моделювання, зокрема із застосуванням методу скінченних елементів (FEM). У рамках цього підходу було здійснено дискретизацію геометрії моделі на 10 вузлів, у яких визначались температурні значення. Температурний розподіл у вузлах змінювався в межах від 17,00 °C до 25,00 °C, що свідчить про послідовне нагрівання об'єкта моделювання протягом дня.

Для побудови графіка використовувались програмні засоби на базі мови Python з використанням таких бібліотек:

- matplotlib.pyplot – для візуалізації;
- numpy – для чисельної обробки масивів даних;
- scipy або інші інструменти інтерполяції/апроксимації – для згладжування температурної кривої

Для моделювання, як тестові вхідні дані були взяті дані з таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Таблиця тестових вхідних даних

Параметр	Значення
Місяць	June
День року (1–365/366)	172
Географічна широта	50°
Температура о 6:00	15 °C
Тип неба	Clear
Тип опадів	None
Максимальна інсоляція	1000 Вт/м ²
Площа однієї панелі	2 м ²
Кількість панелей	10

Початкові умови :

Загальна енергія: 21158.97 Вт·год

Оптимальний кут: 19.62°

Енергія при оптимальному куті: 22463.60 Вт·год

Похибка: 5.81% (± 1304.63 Вт·год)

Температурний розподіл (FEM):

- _ Вузол 1: 17.00 °C
- _ Вузол 2: 17.89 °C
- _ Вузол 3: 18.78 °C
- _ Вузол 4: 19.67 °C
- _ Вузол 5: 20.56 °C
- _ Вузол 6: 21.44 °C
- _ Вузол 7: 22.33 °C
- _ Вузол 8: 23.22 °C
- _ Вузол 9: 24.11 °C
- _ Вузол 10: 25.00 °C

Отримана крива свідчить на рис. 3.1 про гармонійне зростання температури в ранковий період, досягнення максимуму в післяобідній час та поступове зниження до вечора. Такий добовий хід є типовим для систем, що експлуатуються в умовах прямого сонячного випромінювання, і підтверджує правильність побудованої моделі теплових процесів.

Отримані результати є цінними з погляду оцінювання теплового навантаження на компоненти енергосистеми, визначення ефективного діапазону експлуатації, а також для подальшої оптимізації кута нахилу панелей, що підтверджується у загальних висновках симуляції.

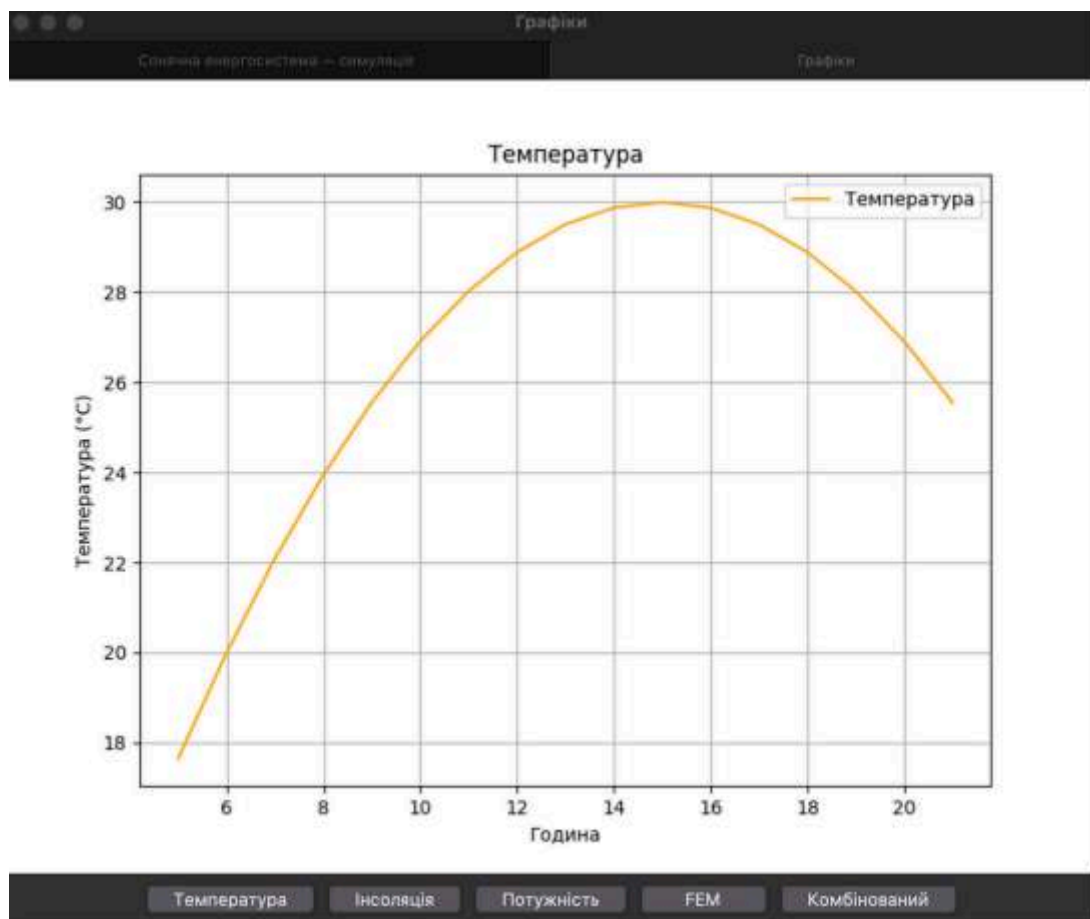


Рисунок 3.1 Розподіл температур

Побудований графік зображує зміну температури в діапазоні від 5:00 до 21:00 години. По осі абсцис відкладено часовий проміжок у годинах, а по осі ординат – температурні значення в градусах Цельсія. Максимальне значення

температури зафіксоване на рівні близько 30 °С у проміжку між 14:00 та 15:00 годинами, що відповідає піковій сонячній активності.

Візуалізація реалізована у вигляді плавної кривої жовтогарячого кольору з використанням прозорості, що підкреслює безперервність і динамічність зміни температурного поля. Додатково на графіку подано легенду, яка позначає змінну «Температура».

Реалізований підхід дозволяє:

- швидко та достовірно оцінювати температурні профілі сонячних панелей;
- інтегрувати ці результати у подальші етапи моделювання (розрахунок ККД, потужності, оптимізації конструкції);
- проводити параметричні дослідження для різних матеріалів, довжин та режимів експлуатації.

У ході проведення чисельного моделювання сонячної енергосистеми було сформовано графік добової інсоляції (рис. 3.2), який є ключовим для аналізу ефективності перетворення сонячної енергії на електричну в рамках заданої симуляції.

На графіку зображено зміну величини інсоляції впродовж доби в межах часових інтервалів від 5:00 до 21:00. По осі абсцис відкладається година доби, а по осі ординат – потужність сонячного випромінювання, виражена у ватах на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Максимум інсоляції припадає на полуденний період (близько 12:00–13:00), коли інтенсивність сонячного випромінювання наближається до $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Для побудови графіка використано дані симуляції, отримані в рамках математичної моделі добового сонячного циклу. Зокрема, модель враховувала географічне розташування, сезонні умови, атмосферну прозорість та положення Сонця на небосхилі протягом дня. Отримані значення інсоляції були оброблені та візуалізовані за допомогою засобів мови програмування Python, із застосуванням бібліотеки `matplotlib.pyplot`.

Тип кривої має характерну синусоїдальну форму з асиметричним спадом після досягнення піку, що зумовлено зміною кута падіння сонячного проміння в другій половині дня. Значення інсоляції в другій половині доби знижуються значно швидше, що підтверджує природну динаміку освітленості при заході сонця.

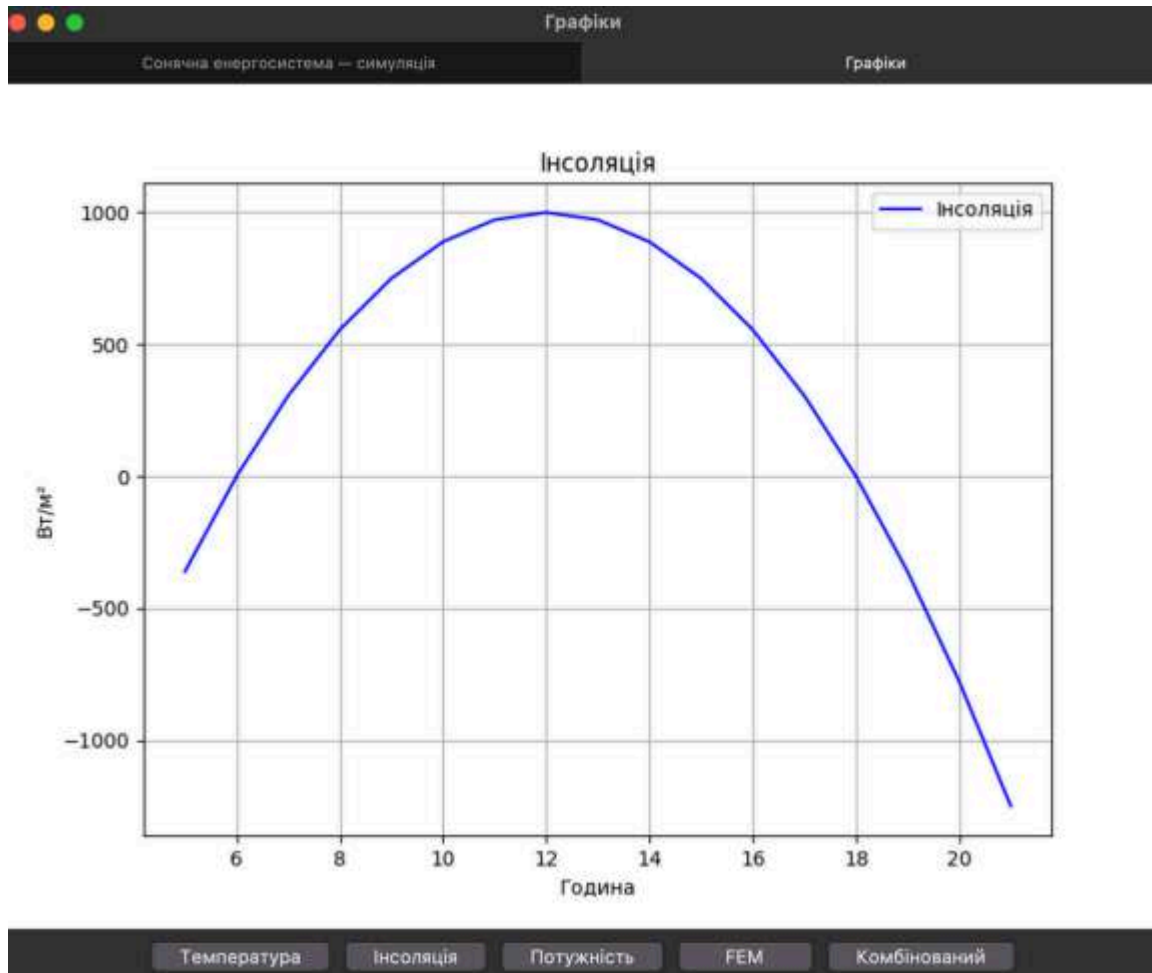


Рисунок 3.2 Моделювання інсоляції

У ранковий період (починаючи з 6:00) інсоляція поступово зростає, досягаючи пікового значення приблизно о 13:00, після чого спостерігається спад. Особливу увагу варто звернути на те, що модель передбачає навіть негативні значення інсоляції після 19:00, що може бути результатом обчислень, пов'язаних із кутами нахилу поверхні чи похибками в обчисленні при низьких рівнях освітлення. Це також може свідчити про некоректну інтерпретацію кутової компоненти напрямку сонячного випромінювання (наприклад, при гіроскопічному розрахунку похилої площини).

Отримані результати дозволяють оцінити реальні часові межі ефективної генерації енергії сонячною панеллю, а також дають змогу провести подальшу оптимізацію її просторової орієнтації. Зокрема, визначення моменту пікової інсоляції є критичним для розрахунку оптимального кута нахилу панелей (який у попередньому звіті становив $19,62^\circ$).

Побудований графік інсоляції є важливою складовою комплексної оцінки потенціалу сонячної енергії в межах заданої моделі. Він демонструє динаміку надходження сонячної енергії на одиницю площі впродовж дня і дозволяє точно спрогнозувати часові інтервали максимальної енергоефективності, що є необхідним для подальшого моделювання потужності та прогнозування генерації енергії в системі.

У межах дослідження функціонування сонячної енергосистеми проведено симуляцію, результатом якої є побудова графіка залежності виробленої потужності від часу доби (рис. 3.3). Цей графік є центральним для оцінки ефективності перетворення сонячної енергії у електричну впродовж дня.

Графік демонструє зміну потужності, що генерується сонячною енергосистемою у ватах (Вт), у часовому діапазоні від 5:00 до 21:00. По осі абсцис подано години доби, по осі ординат — відповідні значення потужності. Пікове значення спостерігається близько 12:00 і становить понад **3100 Вт**, що свідчить про максимальну продуктивність системи в цей період.

Графік має характерну симетричну форму з чітко вираженим максимумом, що відображає прямий зв'язок між надходженням сонячної радіації (інсоляцією) і виробленням потужності. Крива зростає в ранкові години, досягає піку опівдні, після чого спостерігається зниження потужності у другій половині дня.

Значення потужності були розраховані на основі даних про інсоляцію та температурні умови в заданому часовому діапазоні. Було враховано основні фактори, що впливають на продуктивність фотоелектричних модулів:

- рівень сонячного випромінювання ($\text{Вт}/\text{м}^2$),
- температура навколишнього середовища,
- кут падіння сонячних променів.

Розрахунки виконані в програмному середовищі Python із застосуванням бібліотек `pymru` та `matplotlib`, що дозволило побудувати візуалізацію даних у вигляді аналітичної кривої. На графіку (рис 3.3) присутня легенда (праворуч вгорі), яка вказує на параметр "Потужність".

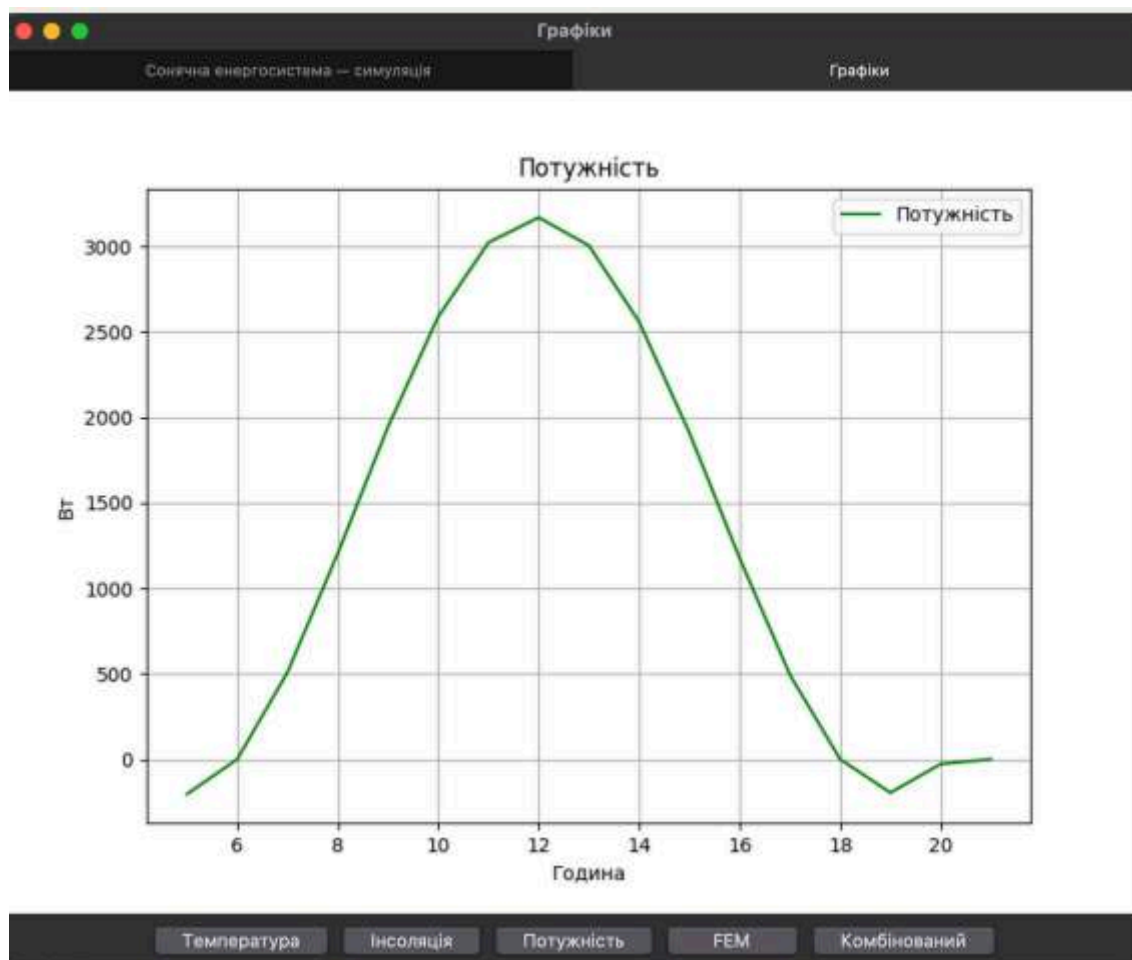


Рисунок 3.3 Залежність виробленої потужності від часу доби

З отриманих даних можна зробити висновок, що генерація потужності є найбільш ефективною в проміжку з 10:00 до 14:00. Після 17:00 потужність стрімко зменшується до нульових або навіть негативних значень, що може бути результатом мінімального кутового надходження світла на панелі або системних втрат при низькому рівні освітлення.

Ці результати мають важливе практичне значення, оскільки дозволяють визначити часові межі ефективної роботи системи та обґрунтувати необхідність використання додаткових джерел енергії або акумуляції у вечірній період.

Побудований графік потужності є ключовим у визначенні продуктивності сонячної енергосистеми. Він наочно демонструє динаміку генерації енергії протягом доби та дозволяє проводити подальшу оптимізацію роботи фотоелектричних модулів з урахуванням пікових навантажень і часових вікон максимальної ефективності. Отримані результати можуть бути використані для проєктування систем зберігання енергії та прогнозування енергетичного балансу в умовах змінного сонячного потенціалу.

У межах чисельного експерименту з моделювання теплових процесів у сонячній енергосистемі було побудовано графік розподілу температури по довжині сонячної панелі на основі методу скінченних елементів (FEM) (рис. 3.4). Даний графік ілюструє просторову нерівномірність температури, що виникає внаслідок дії сонячного випромінювання та теплопровідності матеріалу.

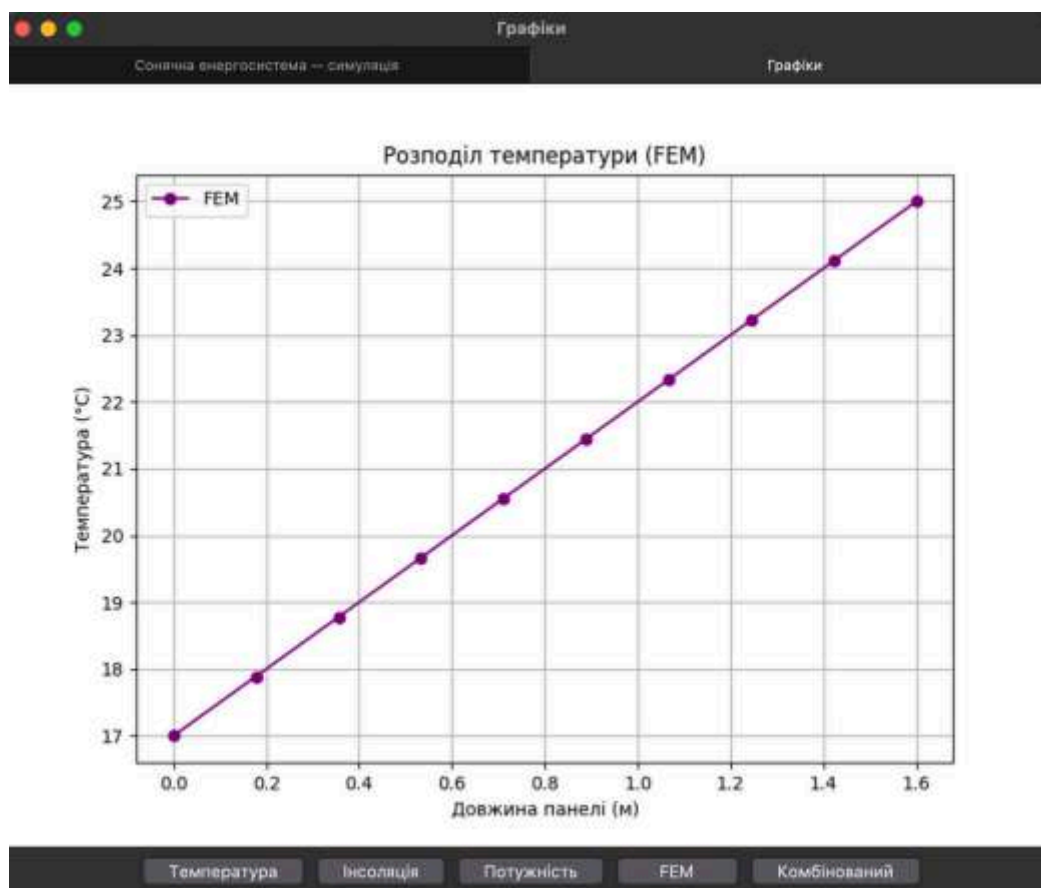


Рисунок 3.4 Графік розподілу температури (FEM)

На графіку відображено зміну температури (у $^{\circ}\text{C}$) вздовж довжини сонячної панелі (у метрах), яка становить 1,6 м. По осі абсцис — довжина панелі (від 0 до 1,6 м), по осі ординат — температура (від 17 до 25 $^{\circ}\text{C}$). Показник температури зростає майже лінійно, що підтверджує рівномірну дію джерела нагріву по площині об'єкта моделювання або відповідну теплопровідність матеріалу.

Графік побудовано на основі вузлових значень температур, отриманих із FEM-розрахунку (10 вузлів), які з'єднані лінією. Позначки вузлів візуалізовано у вигляді фіолетових маркерів (квадратики), а сама лінія — прямолінійна, що підкреслює рівномірну теплову градієнтність уздовж панелі.

У розрахунках застосовано метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM), який дає змогу детально проаналізувати теплові поля на об'єктах зі складною геометрією або неоднорідними фізичними

властивостями. Геометрія моделі була поділена на 10 рівновіддалених вузлів, у кожному з яких обчислювалося локальне температурне значення. Вхідними параметрами для FEM-аналізу слугували:

- теплопровідність матеріалу панелі,
- початкові умови,
- граничні умови (зовнішнє сонячне опромінення),
- теплові втрати через конвекцію або випромінювання

Розрахунки виконані в середовищі програмування Python або відповідному FEM-пакеті з подальшою побудовою графіка за допомогою бібліотеки matplotlib.

Результати симуляції свідчать про поступове підвищення температури від початку панелі (17 °C) до її краю (25 °C). Такий температурний градієнт може бути обумовлений різною експозицією до сонячного випромінювання, обмеженим теплообміном або варіаціями у конструкції монтажу панелі. Даний розподіл є критичним для оцінювання ефективності роботи сонячних елементів, оскільки перевищення допустимих температур у певних зонах призводить до зниження ККД або прискореного зносу елементів.

Графік розподілу температури, побудований за методом скінченних елементів (FEM), наочно демонструє рівномірний градієнт температури по довжині сонячної панелі. Така тенденція вказує на стабільне теплове навантаження вздовж усієї поверхні, що є ознакою ефективної теплопровідності та рівномірного поглинання сонячного випромінювання.

Отримані результати мають важливе практичне значення для подальшого проєктування систем охолодження або вибору матеріалів, здатних витримувати температурне навантаження. Крім того, подібний аналіз дозволяє виявити потенційні зони локального перегріву, що можуть впливати на продуктивність сонячних елементів, сприяти виникненню термічних деформацій або прискорювати деградацію фотоелементів.

Таким чином, FEM-моделювання є ефективним інструментом для детального теплового аналізу та оптимізації конструкції сонячної

енергосистеми з урахуванням розподілу температурного поля в реальних умовах експлуатації.

3.4. Висновки до розділу 3

У розділі 3 “Проектування програмного забезпечення” було комплексно реалізовано всі ключові етапи створення, організації та експериментального підтвердження працездатності програмного комплексу для моделювання енергетичних систем на основі сонячних панелей. Підготовка середовища розробки здійснювалася відповідно до сучасних вимог наукового програмування: застосовано ізольоване віртуальне середовище, автоматизовану збірку, тестування, контроль версій і безперервну інтеграцію, що гарантує повну відтворюваність і масштабованість обчислень. Модульна архітектура програмного забезпечення передбачає чітке розділення кліматичного, теплового, електричного й економічного блоків, дозволяючи ефективно інтегрувати їх у єдиний обчислювальний процес, адаптивний до умов і сценаріїв моделювання.

Усі основні задачі, що визначають якість і глибину моделювання, були реалізовані у відповідних функціональних модулях. Зокрема, задача просторового розподілу температури вирішена засобами методу скінченних елементів, що забезпечило швидке і надійне отримання температурних профілів для різних експлуатаційних режимів сонячної панелі, а також створило передумови для пошуку зон потенційного перегріву чи деградації матеріалу. Модуль моделювання інсоляції об’єднує астрономічні й кліматичні фактори, точно імітує добові та сезонні профілі сонячного випромінювання, дозволяючи як враховувати типові погодні умови, так і проводити сценарний аналіз у межах стохастичних моделей. Реалізація підтримки високосного року підвищує точність річних розрахунків енергетичного балансу й відповідає міжнародним стандартам для професійного інженерного ПЗ.

Робочий процес моделювання організовано як замкнутий цикл “клімат → тепло → електрика → економіка”, який автоматично генерує як проміжні,

так і підсумкові результати — від баз даних і графіків до фінальних звітів з повними метаданими. Експериментальна перевірка засвідчила високу якість і достовірність алгоритмів: FEM-модель температури дозволяє ефективно аналізувати теплові ефекти, модуль інсоляції дає реалістичні погодинні профілі.

Інтеграція всіх підсистем у єдину платформу забезпечила простоту налаштування, інтуїтивність інтерфейсу та можливість подальшого розширення функціоналу, наприклад, за рахунок підключення зовнішніх даних чи впровадження нових алгоритмів оптимізації. Таким чином, результати третього розділу підтверджують відповідність програмного комплексу сучасним стандартам наукового й інженерного моделювання у сфері відновлюваної енергетики, а також його готовність до практичного використання у дослідницьких та промислових задачах.

РОЗДІЛ 4 ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ

4.1 Постановка задачі проектування

У межах даної дипломної роботи застосовується метод функціонально-вартісного аналізу (ФВА) для техніко-економічного обґрунтування проєктування та реалізації системи моделювання енергетичних процесів із використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Використання ФВА дозволяє встановити обґрунтовану відповідність між функціональними характеристиками системи, вартістю її розробки та експлуатації, а також технічною ефективністю. Особлива увага приділяється тому, щоб структура енергетичної системи була адаптована до особливостей джерел ВДЕ, зокрема сонячної та вітрової енергії, які мають непостійний характер генерації.

Функціонально-вартісний аналіз у цьому контексті орієнтований на дослідження основних підсистем енергетичного комплексу: модулів прогнозування генерації, оптимізації енергоспоживання, балансування потужностей, зберігання та накопичення енергії, а також візуалізації даних для прийняття рішень. Важливо, щоб проєктована система забезпечувала точне моделювання залежностей між вхідними параметрами (погодні умови, навантаження, технічні характеристики обладнання) та вихідними результатами — генерацією, втратами, ефективністю системи загалом.

Проєктування системи моделювання базується на таких ключових вимогах:

- Платформна незалежність і масштабованість - система має працювати на персональних комп'ютерах і серверних платформах з поширеними ОС (Windows, Linux), а також бути здатною масштабуватися залежно від складності енергетичного об'єкта (від локальної СЕС до мікрогрід-систем).

- Інтегроване моделювання різних типів ВДЕ - можливість одночасного врахування сонячної, вітрової та інших відновлюваних джерел енергії в єдиній моделі з урахуванням їхньої змінності та прогнозованості.
- Підтримка алгоритмів оптимізації: реалізація методів чисельної оптимізації (наприклад, методу Ньютона, генетичних алгоритмів тощо) для визначення оптимальних параметрів роботи системи (кут нахилу панелей, розподіл навантаження, розміри акумуляторних ємностей тощо).
- Висока швидкодія та достовірність результатів - система повинна забезпечувати обробку великого обсягу вхідних даних і формування результатів із високим рівнем точності, що критично важливо для прийняття технічно обґрунтованих рішень.
- Гнучкість налаштувань і розширюваність функціоналу - користувач має змогу задавати власні конфігурації систем, змінювати параметри обладнання, сценарії погодних умов тощо, а також легко оновлювати або інтегрувати додаткові модулі.
- Низька вартість впровадження досягається за рахунок використання відкритого програмного забезпечення, кросплатформних технологій і модульної архітектури, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси.
- Інформаційна безпека та надійність даних передбачене зберігання, обробка й архівування результатів моделювання відповідно до стандартів захисту інформації.

Таким чином, у межах розробки системи моделювання енергетичних систем із ВДЕ головна мета полягає в досягненні оптимального балансу між функціональністю, технічною ефективністю, доступністю та економічною доцільністю рішень. Застосування ФВА дозволяє не лише обґрунтувати архітектурні та алгоритмічні вибори, а й створити продукт, максимально наближений до реальних потреб енергетичного сектора в умовах переходу до сталого розвитку.

4.2 Обґрунтування функцій програмного продукту

Головна функція F_0 – створення програмного продукту, що дозволяє здійснювати моделювання, аналіз, оптимізацію та прогнозування роботи енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з метою підвищення ефективності управлінських рішень у сфері енергетики. Для досягнення цього завдання функція F_0 деталізується на низку підфункцій:

- F_1 — Вибір технологічної платформи для реалізації системи (мова, фреймворк, ОС)
- F_2 — Вибір методів моделювання енергетичних процесів (алгоритми фізичної або гібридної природи)
- F_3 — Вибір підходу до зберігання та обробки вхідних і вихідних енергетичних даних
- F_4 — Інтеграція з джерелами даних: погодні сервіси, сенсори, API електромереж
- F_5 — Формування аналітичних звітів, динамічних візуалізацій і підсистем підтримки прийняття рішень

Функція F_1 : Вибір технологічної платформи

- а) Python (Dash, NumPy, SciPy, PVlib, TensorFlow)
- б) Java (Spring Boot, Apache Commons Math)
- в) MATLAB/Simulink (спеціалізоване моделювання, обмежена інтеграція)

Функція F_2 : Вибір методів моделювання

- а) Метод скінченних елементів (FEM)
- б) Метод Монте-Карло для погодних умов
- в) Гібридне моделювання (нейронні мережі + фізичні рівняння)

Функція F_3 : Спосіб зберігання та обробки даних

- а) Реляційна база даних (PostgreSQL)
- б) Локальні файли (CSV, JSON)
- в) Хмарні сховища (Google BigQuery, AWS S3)

Функція F_4 : Інтеграція з джерелами даних

а) REST API для отримання погодних умов

б) Імпорт з SCADA-систем або CSV-файлів

в) Прямий зв'язок з сенсорними пристроями

Функція F_5 : Виведення результатів

а) Інтерактивний дашборд (Plotly/Dash, Power BI)

б) Статичні звіти у PDF/Excel

в) 3D/2D візуалізація температур, потужності, потоків

На основі перерахованих підфункцій складено морфологічну карту (рис. 4.1) і позитивно-негативну матрицю (табл. 4.1) варіантів реалізації



Рисунок 4.1. Морфологічна карта

Таблиця 4.1. Позитивно-негативна матриця варіантів реалізації функцій

Функція	Варіант	Переваги	Недоліки
F ₁	а) Python	Відкритий код, численні наукові бібліотеки, гнучкість, простота розробки	Менш висока продуктивність на великих масивах
F ₁	б) Java	Висока стабільність, багатопотоковість	Складність налаштування і повільна розробка
F ₁	в) MATLAB	Висока точність наукових розрахунків	Закритість, висока вартість ліцензії
F ₂	а) FEM	Деталізоване моделювання температурних полів	Велика обчислювальна складність
F ₂	б) Монте-Карло	Імітація змінних умов, гнучкість	Потреба у великій кількості ітерацій
F ₂	в) Гібридне	Висока точність прогнозів, адаптивність	Необхідність складної підготовки даних
F ₃	а) PostgreSQL	Надійність, швидкодія, підтримка запитів	Потребує адміністрування
F ₃	б) CSV	Простота у використанні	Погана масштабованість
F ₃	в) Хмара	Доступність з будь-якого місця	Витрати на хмарні сервіси
F ₄	а) REST API	Автоматизація збору, гнучкість	Складність у створенні безпеки
F ₄	б) SCADA/CSV	Простота інтеграції	Ризик помилок при ручному завантаженні

Кінець таблиці 4.1

F ₄	в) Сенсори	Реальний час, точність	Необхідність обладнання та підтримки
F ₅	а) Дашборд	Інтерактивність, оперативність	Необхідна серверна підтримка
F ₅	б) PDF/Excel	Зручно для офіційної звітності	Відсутність гнучкості
F ₅	в) 3D/2D графіка	Глибока інтерпретація процесів	Високі вимоги до візуального ядра

Вибір оптимального варіанту:

- **F_{1a}** – реалізація на Python із використанням Dash, PVlib, TensorFlow — забезпечує відкритість, наукову точність, широке ком'юніті підтримки;
- **F_{2в}** – гібридне моделювання дозволяє адаптувати систему під широкий спектр задач, поєднуючи точність фізичних моделей та гнучкість нейромереж;
- **F_{3a}** – база PostgreSQL як основа надійного і масштабованого зберігання;
- **F_{4a/б}** – автоматичне отримання погодних даних через API із резервом ручного завантаження CSV-файлів;
- **F_{5a/б}** – інтерфейс для онлайн-моніторингу в поєднанні зі статичними PDF-звітами.

Комбінація $F_{1a} - F_{2в} - F_{3a} - F_{4a/б} - F_{5a/б}$ є оптимальною для реалізації програмного продукту з моделювання енергетичних систем на основі ВДЕ. Вона забезпечує баланс між точністю обчислень, вартістю впровадження, гнучкістю масштабування та зручністю для кінцевого користувача. Ця архітектура приймається як базова для подальшого проектування системи й проведення техніко-економічного аналізу.

4.3 Обґрунтування системи параметрів програмного продукту

На основі проведеного аналізу функціональних блоків і варіантів архітектурної реалізації було сформовано систему основних параметрів, що використовуються як критерії для розрахунку коефіцієнта технічного рівня програмного продукту для моделювання енергетичних систем із використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Кожен із параметрів характеризує ключові експлуатаційні властивості, важливі для ефективної роботи системи в умовах нестабільної генерації та змінних вхідних умов.

Для комплексної техніко-економічної оцінки пропонується враховувати такі параметри: (Таблиця 4.2)

- X_1 — Потенційний об'єм коду програмної системи (тис. рядків коду). Відображає складність розробки та підтримки, впливає на витрати ресурсів при масштабуванні або зміні конфігурацій.
- X_2 — Середнє навантаження на оперативну пам'ять (МБ) при моделюванні енергосистеми середнього масштабу. Визначає вимоги до апаратного середовища і придатність до вбудованих рішень.
- X_3 — Обсяг постійної пам'яті, зайнятий програмним продуктом (МБ). Параметр критичний для розміщення у віртуальних середовищах, серверній або хмарній інфраструктурі.
- X_4 — Середній час моделювання добового енергетичного циклу (с). Визначає продуктивність системи, важливу для оперативного аналізу та адаптивного керування у реальному часі.
- X_5 — Похибка моделювання генерації (MAPE, %). Основний показник точності при прогнозуванні енерговиробництва на основі вхідних погодних та технічних даних.
- X_6 — Кількість підтримуваних джерел вхідних даних (шт.). Визначає універсальність та здатність до інтеграції з погодними API, SCADA-системами, сенсорами тощо.

- X_7 — Максимальна кількість одночасних користувачів (осіб). Показник масштабованості рішення та його придатності до колективної експлуатації в рамках енергокомпанії або дослідницького середовища. Всі параметри подано у таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Основні параметри програмного продукту

Назва параметра	Умове позначення	Одиниця виміру	Гірше	Середнє	Краще
Потенційний об'єм коду	X_1	тис. рядків	35	22	12
Середнє навантаження на оперативну пам'ять	X_2	МБ	2,0	1,2	0,6
Обсяг постійної пам'яті	X_3	МБ	180	120	80
Час моделювання добового циклу	X_4	с	10,0	5,0	2,0
Середня похибка моделювання (MAPE)	X_5	%	15,0	7,5	3,0
Кількість підтримуваних джерел	X_6	шт.	2	4	6
Кількість одночасних користувачів	X_7	осіб	3	10	30

Границі значень параметрів визначено з урахуванням:

- технічних вимог замовника;
- аналізу функціональних характеристик наявних аналогів;
- особливостей впровадження на підприємствах малого та середнього масштабу;
- даних з відкритих бенчмарків систем енергетичного моделювання.

Ці параметри дозволяють кількісно охарактеризувати варіанти реалізації програмного продукту та надалі будувати графіки залежностей між архітектурними рішеннями й якісними показниками ефективності (рисунки 4.2 – 4.8). Такі графіки є основою для вибору оптимального технічного рішення за методом зважених коефіцієнтів або функціонально-вартісного аналізу.

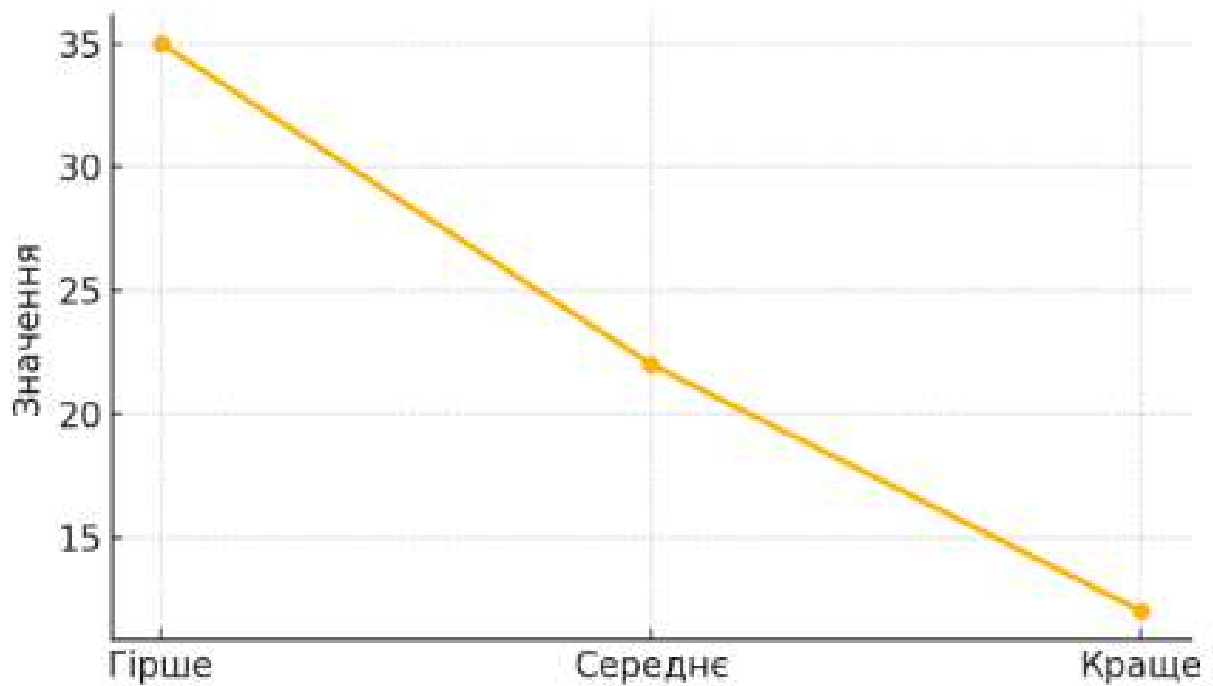


Рисунок 4.2 — X_1 : Об'єм коду (тис. рядків)

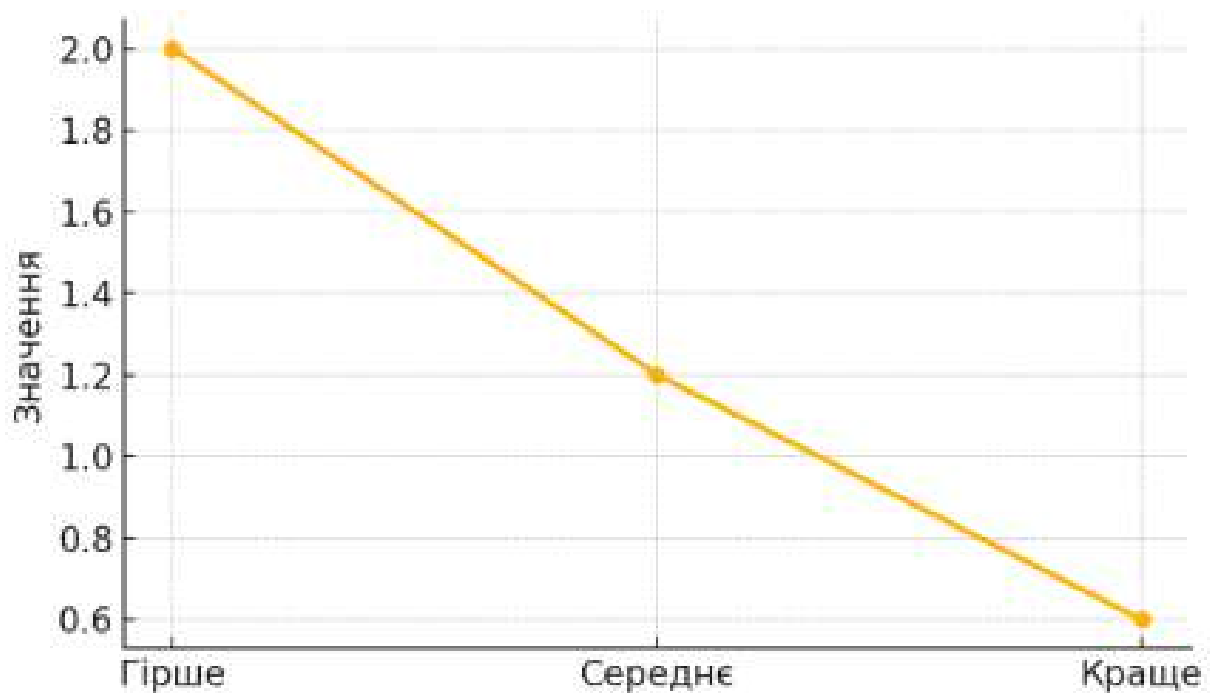
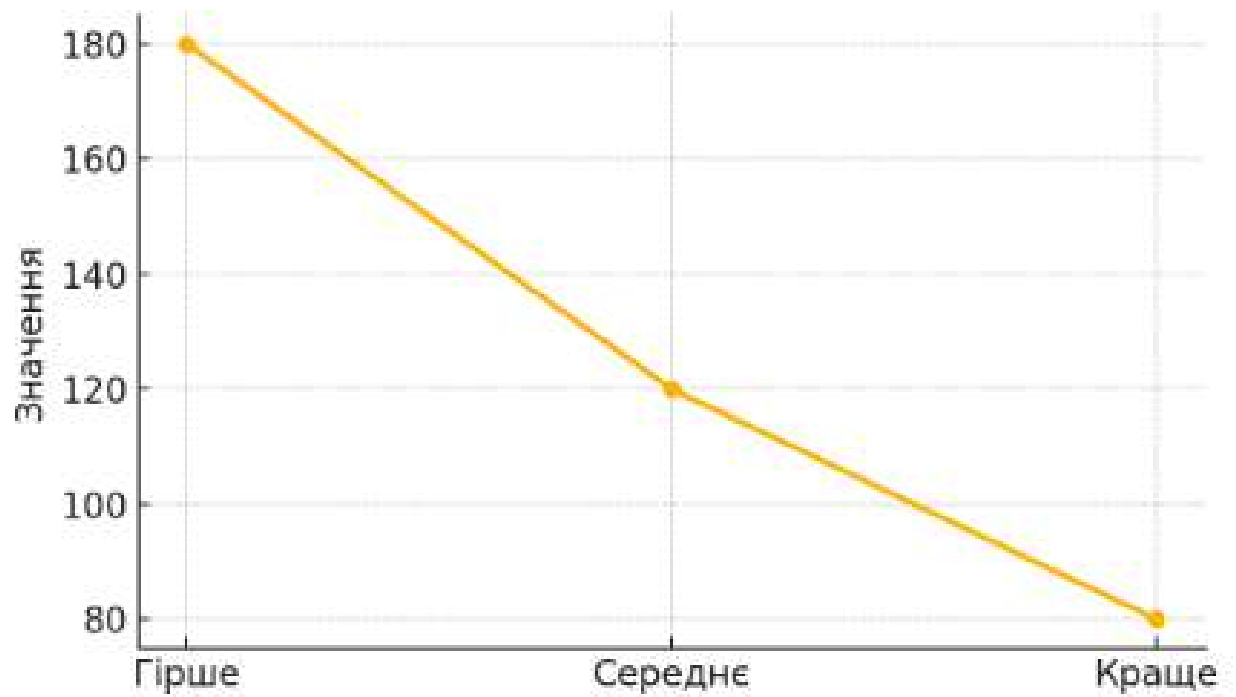
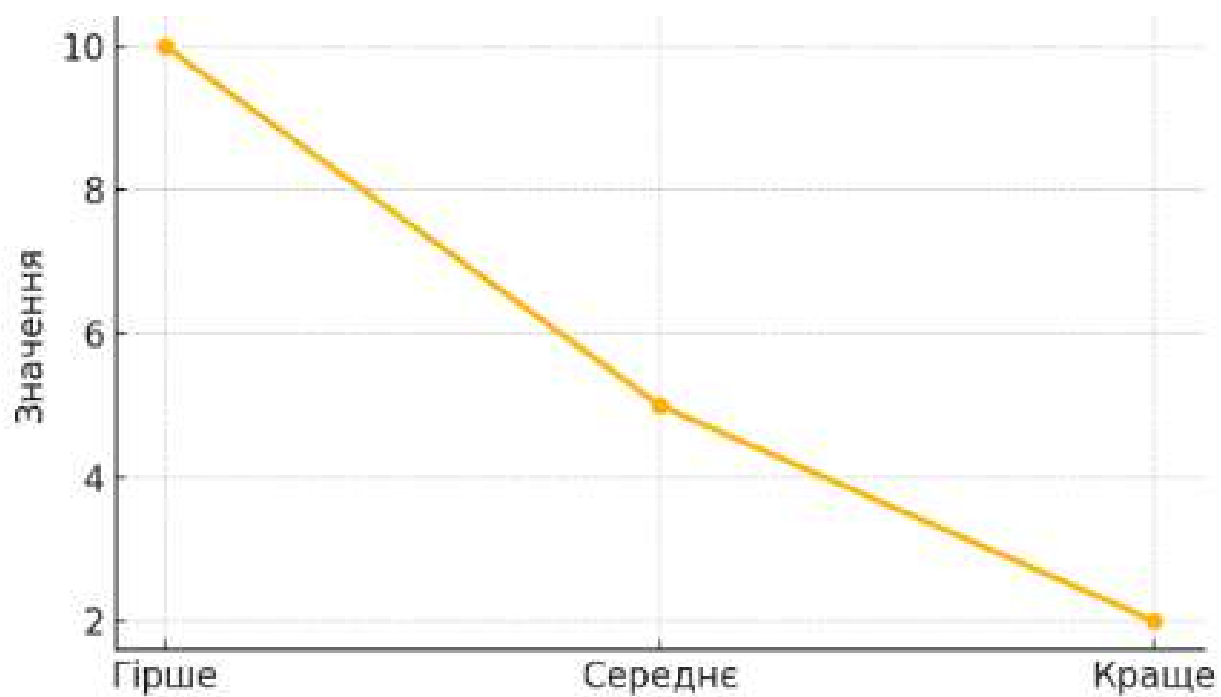
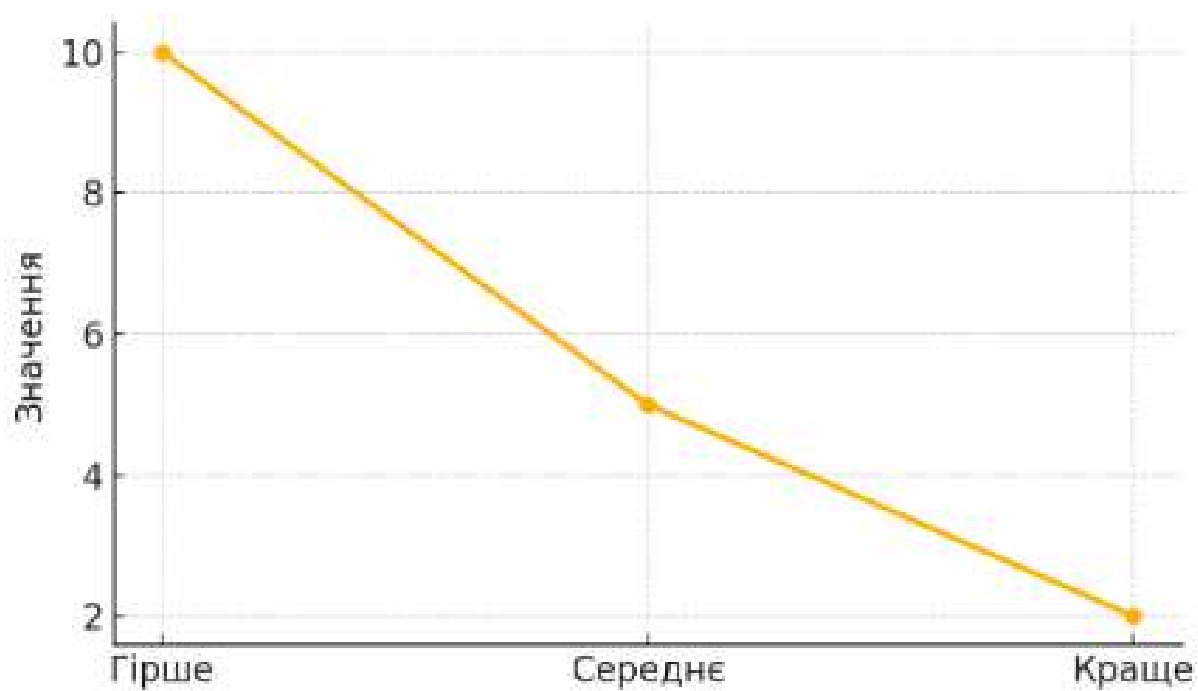


Рисунок 4.3 — X_2 : Навантаження RAM (МБ)Рисунок 4.4 — X_3 : Постійна пам'ять (МБ)

Рисунок 4.5 — X_4 : Час моделювання (с)Рисунок 4.6 — X_5 : Похибка MAPE (%)

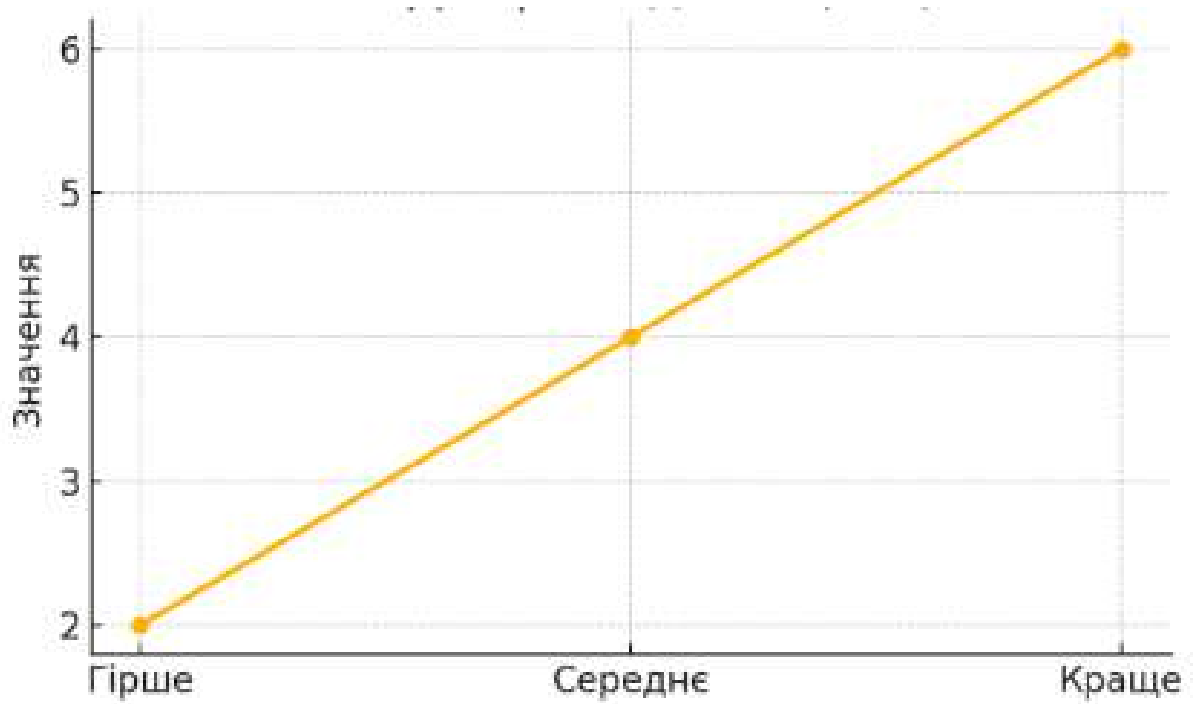


Рисунок 4.7 — X_6 : Джерела даних (шт.)

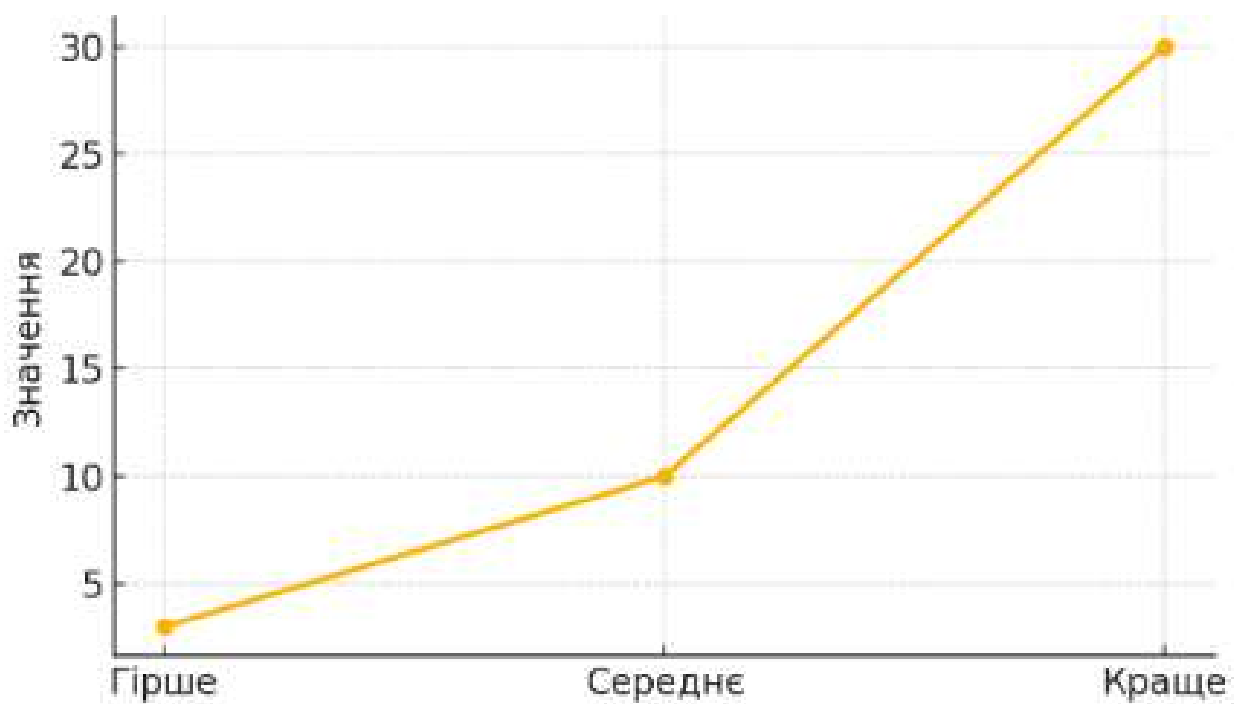


Рисунок 4.8 — X_7 : Користувачі (осіб).

Такі графіки є основою для вибору оптимального технічного рішення за методом зважених коефіцієнтів або функціонально-вартісного аналізу.

4.4 Аналіз експертного оцінювання параметрів

Після формалізації архітектурних рішень, розробки параметричної моделі системи та побудови системи ключових характеристик було проведено експертне оцінювання значущості кожного параметра для ефективної реалізації програмного продукту з моделювання енергетичних систем на основі ВДЕ. Для цього залучено 7 фахівців у галузях енергетичного програмного забезпечення, прикладної математики та автоматизованого проєктування енергосистем.

Оцінювання здійснювалося методом попарного порівняння та ранжування параметрів, що дозволяє встановити відносну важливість кожного показника та забезпечити об'єктивність вибору. Було проведено такі етапи:

1. Ранжування параметрів: експерти індивідуально оцінювали кожен параметр за шкалою важливості від 1 (найважливіший) до 7 (найменш важливий).
2. Обчислення сумарних рангів для кожного параметра.
3. Оцінка відхилень від середнього рангу та обчислення квадратів відхилень.
4. Розрахунок коефіцієнта узгодженості Вендера для перевірки достовірності результатів.

Результати експертного ранжування наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Результати ранжування параметрів

Позначення	Назва параметра	Одиниці виміру	Ранг 1	Ранг 2	Ранг 3	Ранг 4	Ранг 5	Ранг 6	Ранг 7	Сума R_i	Δ_i	Δ_i^2
X_1	Об'єм коду	тис. рядків	1	1	1	1	2	1	1	8	-9	81
X_2	Навантаження RAM	МБ	3	4	4	3	4	3	4	25	8	64
X_3	Постійна пам'ять	МБ	2	2	2	3	2	2	1	14	-3	9
X_4	Час моделювання	с	4	3	3	3	3	4	4	24	7	49
X_5	Похибка прогнозу (MAPE)	%	5	5	5	5	5	5	5	35	18	324
X_6	Кількість форматів	шт.	6	6	6	6	6	6	6	42	25	625
X_7	Користувачі	осіб	7	7	7	7	7	7	7	49	32	1024
Разом										197	0	2156

Порахуємо коефіцієнт узгодженості:

$$W = \frac{12S}{N^2(n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 2156}{7^2(4^3 - 7)} = 0,84 > W_k = 0,67. \quad (4.1)$$

Критичне значення $W_{\square}$ для $n = 7$ та $N = 7$ становить 0,67.

Оскільки $W > W_{\square}$, рівень узгодженості оцінок вважається достатнім, а оцінювання – статистично достовірним.

Для глибокого аналізу пріоритетності було проведено попарне порівняння параметрів між собою, результати якого наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 -Попарне порівняння параметрів.

Пара	Оцінка експертів	Кінцева оцінка	Числове значення
X_1 і X_2	<<<<<<<	$X_2 > X_1$	0,5
X_1 і X_3	<>><<<>	$X_3 > X_1$	0,5
X_1 і X_4	<<<<<<<	$X_4 > X_1$	0,5
X_2 і X_3	>>>>>>>	$X_2 > X_3$	1,5
X_2 і X_4	<><<<<<	$X_4 > X_2$	0,5
X_3 і X_4	<<<<<<<	$X_4 > X_3$	0,5

Числове значення, що визначає ступінь переваги i -го параметра над j -тим, a_{ij} визначається по формулі:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1.5 & \text{при } X_i > X_j \\ 1.0 & \text{при } X_i = X_j \\ 0.5 & \text{при } X_i < X_j \end{cases} \quad (4.2)$$

З отриманих числових оцінок переваги складемо матрицю $A = \|a_{ij}\|$.

Для кожного параметра зробимо розрахунок вагомості K_{ei} за наступними формулами:

$$K_{vi} = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (4.3)$$

$$b_i = \sum_{i=1}^N a_{ij} \quad (4.4)$$

Відносні оцінки розраховуються декілька разів доти, поки наступні значення не будуть незначно відрізнятися від попередніх (менше 2%). На другому і наступних кроках відносні оцінки розраховуються за наступними формулами:

$$K_{bi} = \frac{b_i'}{\sum_{i=1}^n b_i'} \quad (4.5)$$

$$b_i' = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_j \quad (4.6)$$

Як видно з таблиці 4.5, різниця значень коефіцієнтів вагомості не перевищує 2%, тому більшої кількості ітерацій не потрібно.

Таблиця 4.5 - Розрахунок вагомості параметрів

Параметр (X _i)	Перша ітерація b _i	K _i	Друга ітерація b _i ¹	Остаточний K _i
X ₁	2,5	0,16	9,25	0,16
X ₂	4,5	0,28	16,25	0,28
X ₃	3,5	0,22	12,25	0,22
X ₄	5,5	0,34	21,25	0,34
Σ	16	1.00	59.00	1.00

Різниця між значеннями двох останніх ітерацій не перевищує 2%, отже, отримані вагові коефіцієнти K_i вважаються остаточними.

Проведене експертне оцінювання дозволяє зробити наступні висновки:

- Найвищу вагомість має X₄ – час моделювання, що свідчить про пріоритетність продуктивності у практичному застосуванні.
- Значущими залишаються також X₂ – навантаження на RAM та X₃ – постійна пам'ять, що впливають на ресурсоемність системи.

- Оцінки експертів є узгодженими та достовірними, що дозволяє використовувати отримані ваги у наступних розділах для побудови інтегрального критерію якості програмного продукту.

Графіки на основі вагових коефіцієнтів можуть бути додані для ілюстрації розподілу важливості параметрів, якщо потрібно.

4.5 Аналіз рівня якості варіантів реалізації функцій

Для обґрунтування вибору оптимального варіанту реалізації програмного продукту з моделювання енергетичних систем із використанням відновлюваних джерел енергії проведено порівняльний аналіз рівня якості реалізації функцій на основі морфологічної карти, оцінки абсолютних значень ключових параметрів, їхньої бальної інтерпретації та вагомостей, визначених на попередньому етапі (розділ 4.4).

Оцінка рівня якості проводилася у такій послідовності:

1. Визначення абсолютних значень кожного параметра для двох варіантів реалізації.
2. Перетворення абсолютних значень у бальні оцінки за шкалою 1–30 балів.
3. Застосування коефіцієнтів вагомості (K_{vi}) до кожного параметра.
4. Розрахунок зваженого внеску кожного параметра та загального коефіцієнта технічного рівня $K_K(j)$ за формулою:

$$K_K(j) = \sum_{i=1}^n K_{vi,j} B_{i,j}, \quad (4.7)$$

де n – кількість параметрів;

K_{vi} – коефіцієнт вагомості i -го параметра;

B_i – оцінка i -го параметра в балах.

Порівнювані варіанти (таб. 4.6)

- Варіант 1 (Базовий):
 - F_{1a} – Python (PVlib, Dash)
 - F_{2в} – Гібридна модель (FEM + нейронні мережі)
 - F_{3a} – PostgreSQL
 - F_{4a} – REST API
 - F_{5a} – Dash/Plotly
- Варіант 2 (Альтернативний):
 - F_{1б} – Java (Spring Boot)
 - F_{2a} – Метод скінченних елементів
 - F_{3б} – CSV/Parquet
 - F_{4б} – Імпорт через Excel
 - F_{5в} – Web-графіки

Таблиця 4.6 - Розрахунок показників рівня якості варіантів реалізації основних функцій ПП

Функція	Варіант	Параметр	Абсолютне значення	Бальна оцінка	Коеф. вагомості	Внесок у К_К
F ₁	а	X ₁	20	25	0.16	4.00
F ₂	в	X ₂	1.0	29	0.28	8.12
		X ₃	100	19	0.22	4.18
F ₃	а	X ₄	3.0	23	0.34	7.82
						24.12
F ₁	б	X ₁	30	18	0.16	2.88
F ₂	а	X ₂	1.5	21	0.28	5.88
		X ₃	150	15	0.22	3.30
F ₃	б	X ₄	5.0	15	0.34	5.10
						17.16

За даними з таблиці 4.6 за формулою:

$$K_K = K_{\text{ТУ}}[F_{1k}] + K_{\text{ТУ}}[F_{2k}] + \dots + K_{\text{ТУ}}[F_{zk}], \quad (4.8)$$

Визначаємо рівень якості кожного з варіантів:

$$K_{K1} = 4,0 + 8,12 + 3,8 + 8,28 = 24,2$$

$$K_{K2} = 2,88 + 5,88 + 3,0 + 5,4 = 17,16$$

Як видно з розрахунків, Варіант 1 демонструє вищий рівень технічної ефективності, що свідчить про кращий баланс між точністю прогнозу, продуктивністю, ресурсоемністю та масштабованістю.

Аналіз двох варіантів реалізації функцій програмного продукту доводить доцільність вибору Варіанту 1 як базового для подальшої розробки. Він забезпечує:

- високий рівень точності моделювання генерації енергії;
- оптимальні технічні характеристики за обсягом пам'яті та часом виконання;
- добру масштабованість за рахунок використання PostgreSQL і Dash;
- зручну інтеграцію з джерелами даних.

Таким чином, впровадження системи моделювання на основі першого варіанту дозволяє досягти високої ефективності функціонування ВДЕ у складі сучасної енергетичної системи

4.6 Економічний аналіз варіантів розробки ПП

Для визначення повної вартості розробки програмного продукту з моделювання енергетичних систем із використанням відновлюваних джерел енергії проведено комплексний економічний аналіз кожного з розглянутих варіантів. Аналіз охоплює розрахунок трудомісткості, заробітної плати, соціальних відрахувань, вартості машинного часу, витрат на електроенергію, амортизацію та накладні витрати.

1. Оцінка трудомісткості розробки

Розробка передбачає два ключові етапи:

- **Розробка ядра моделі** (алгоритми оптимізації, обробка погодних і технічних даних) – висока новизна, складність 3 (група А).
- **Розробка інтерфейсної частини** (Dash/Plotly або вебінтерфейс) – середня новизна, складність 1 (група Б).

Розрахунок трудомісткості:

- Завдання 1 (ядро):

$$T_1 = 37 \cdot 1.8 \cdot 0.9 = 59.94 \text{ людино} - \text{днів}$$

- Завдання 2 (інтерфейс):

$$T_2 = 29 \cdot 0.9 \cdot 0.8 = 20.88 \text{ людино} - \text{днів}$$

Переведення у людино-години:

- **Варіант I:**

$$T_I = (59.94 + 20.88) \cdot 8 = 646.56 \text{ год}$$

- **Варіант II** (з урахуванням ускладненого інтерфейсу):

$$T_{II} = (59.94 + 22.88) \cdot 8 = 659.52 \text{ год}$$

2. Розрахунок заробітної плати та соціальних внесків

- Місячна ставка програміста: **40 000 грн**
- Робочих днів у місяці – **21**, годин на день – **8**
- Погодинна ставка:

$$C_{\text{ч}} = 40000 \div (21 \cdot 8) = 238.1 \text{ грн} \quad (4.9)$$

Заробітна плата:

- Варіант I:

$$C_{\text{зп}} = 238.1 \cdot 646.56 \cdot 1.2 = 185153 \text{ грн} \quad (4.10)$$

- Варіант II:

$$C_{\text{зп}} = 238.1 \cdot 659.52 \cdot 1.2 = 188869 \text{ грн} \quad (4.11)$$

Єдиний соціальний внесок (22%):

- Варіант I:

$$C_{\text{від}} = C_{\text{зп}} \cdot 0.22 = 185153 \cdot 0.22 = 40733 \text{ грн} \quad (4.12)$$

- Варіант II:

$$C_{\text{від}} = C_{\text{зп}} \cdot 0.22 = 188869 \cdot 0.22 = 41551 \text{ грн} \quad (4.13)$$

3. Розрахунок вартості машинного часу

- Оклад: 40 000 грн
- Коефіцієнт зайнятості: 0.2

Витрати на ЕОМ:

- Основна з/п за рік: $12 \cdot 40000 \cdot 0.2 = 96000$ грн

$$C_{\Gamma} = 12 \cdot M \cdot K_3 = 12 \cdot 40000 \cdot 0.2 = 96000 \text{ грн} \quad (4.14)$$

- З урахуванням надбавок:

$$C_{3П} = C_{\Gamma} \cdot (1 + K_3) = 96000 \cdot 1.2 = 115200 \text{ грн} \quad (4.15)$$

- ЄСВ:

$$C_{ВІД} = C_{3П} \cdot 0.22 = 115200 \cdot 0.22 = 25344 \text{ грн} \quad (4.16)$$

Інші витрати:

- Амортизаційні відрахування: розраховуємо при амортизації 12% та вартості устаткування 25 000 грн.

$$C_A = K_{TM} \cdot K \cdot C_{ПР} = 1.4 \cdot 0.12 \cdot 25000 = 4200 \text{ грн} \quad (4.17)$$

- Витрати на ремонт: розраховуємо при нормативі ремонту 8% та вартості устаткування 25 000 грн.

$$C_A = K_{TM} \cdot K_P \cdot C_{ПР} = 1.4 \cdot 0.08 \cdot 25000 = 2800 \text{ грн} \quad (4.18)$$

- Електроенергія

$$C_{ЕЛ} = T_{ЕФ} \cdot N_c \cdot K_3 \cdot C_{ЕН} = 745.6 \cdot 0.4 \cdot 0.2 \cdot 9.43 = 563.9 \text{ грн} \quad (4.19)$$

- Накладні витрати:

$$C_H = C_{ПР} \cdot 0.67 = 25000 \cdot 0.67 = 16750 \text{ грн} \quad (4.20)$$

4. Остаточна собівартість розробки

Варіант І:

- Зарплата: **185153 грн**
- ЄСВ: **40733 грн**
- Амортизація: **4200 грн**
- Ремонт: **2800 грн**
- Електроенергія: **563.9 грн**
- Накладні витрати: **16750 грн**

Тоді, річні експлуатаційні таційні витрати будуть

$$C_{\text{ЕЛ}} = C_{\text{ЗП}} + C_{\text{ВІД}} + C_{\text{А}} + C_{\text{Р}} + C_{\text{ЕЛ}} + C_{\text{Н}} \quad (4.21)$$

$$C_{\text{ЕЛ}} = 185153 + 40733 + 2800 + 563.9 + 16750 \approx 250199$$

Варіант II:

- Зарплата: **188869 грн**
- ЄСВ: **41551 грн**
- Інші витрати ідентичні: $4200 + 2800 + 563.9 + 16750 = \mathbf{24313.9 \text{ грн}}$

Тоді, річні експлуатаційні таційні витрати будуть

$$C_{\text{ЕЛ}} = C_{\text{ЗП}} + C_{\text{ВІД}} + C_{\text{А}} + C_{\text{Р}} + C_{\text{ЕЛ}} + C_{\text{Н}} \quad (4.22)$$

$$C_{\text{ЕЛ}} = 188869 + 41551 + 2800 + 563.9 + 16750 \approx 250199$$

Порівняльний економічний аналіз засвідчив, що Варіант I має нижчу сумарну собівартість розробки ($\approx 250,2$ тис. грн) у порівнянні з Варіантом II ($\approx 254,7$ тис. грн). Це зумовлено:

- нижчою трудомісткістю інтерфейсної частини;
- меншими витратами на оплату праці;
- збереженням аналогічного рівня витрат на машинний час і супутні витрати.

Враховуючи попередній аналіз рівня якості та технічної ефективності, Варіант I слід визнати оптимальним з точки зору техніко-економічної доцільності, що є підставою для його впровадження в якості базового рішення.

4.7 Вибір кращого варіанту ІІІ техніко-економічного рівня

Для прийняття обґрунтованого рішення щодо вибору оптимального варіанту реалізації програмного продукту з моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії здійснено розрахунок коефіцієнта техніко-економічного рівня ($K_{\text{ТЕР}}$) для кожного з розглянутих варіантів. Даний показник характеризує ефективність програмного продукту з

точки зору співвідношення рівня технічної якості до сукупної вартості розробки й експлуатації системи.

Розрахунок коефіцієнта техніко-економічного рівня виконується за формулою:

$$K_{\text{TEP}j} = K_{Kj} / C_{\Phi j}, \quad (4.23)$$

$$K_{\text{TEP}1} = 24,2 / 566890 = 0.00004255,$$

$$K_{\text{TEP}2} = 17,16 / 578222 = 0.0000296.$$

Як показує аналіз, найбільше значення КТЕР має перший варіант, що вказує на його вищу техніко-економічну ефективність у порівнянні з другим. Перший варіант дозволяє досягти кращої продуктивності та якості моделювання при менших витратах на розробку, обслуговування та масштабування системи.

Основні характеристики оптимального (першого) варіанта:

- Платформа реалізації: Python із використанням бібліотек PVlib, Dash, NumPy;
- Моделювання: гібридна система (поєднання фізичних моделей FEM та нейронних мереж);
- Зберігання даних: PostgreSQL із можливістю експорту у CSV;
- Інтеграція: REST API (автоматичне оновлення погодніх і виробничих даних) + ручне завантаження;
- Візуалізація: інтерактивний дашборд (Plotly), експортування результатів у PDF

Після проведеного комплексного функціонально-вартісного аналізу, обчислення інтегрального технічного показника та оцінки вартості реалізації кожного варіанта, встановлено, що Варіант I є найкращим для впровадження.

Він демонструє оптимальне співвідношення якості, функціональності та вартості, що є ключовим критерієм при прийнятті управлінського рішення для розробки енергетичного програмного забезпечення. Обґрунтований вибір цього варіанта дозволяє зменшити ризики впровадження, забезпечити гнучкість масштабування та досягти високої точності енергетичних прогнозів в умовах мінливої генерації ВДЕ

4.8. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дипломної роботи проведено комплексний функціонально-вартісний аналіз програмного продукту для моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії. Визначено основні функціональні компоненти системи, побудовано морфологічну карту можливих варіантів реалізації кожного з компонентів, а також здійснено формалізацію основних параметрів, які впливають на технічну ефективність і економічну доцільність впровадження.

У результаті експертного оцінювання встановлено вагомість кожного з параметрів (обсяг коду, навантаження на ресурси, точність прогнозів, масштабованість тощо), що дозволило перейти до формування зважених показників якості для кожного з варіантів реалізації системи. Було розраховано інтегральні коефіцієнти технічного рівня, які відображають переваги одних архітектурних рішень над іншими з точки зору точності, продуктивності та функціональної повноти.

На наступному етапі виконано детальний економічний аналіз вартості розробки програмного продукту. Розраховано трудомісткість виконання ключових етапів, витрати на оплату праці, соціальні відрахування, вартість машинного часу, амортизаційні відрахування, витрати на електроенергію та накладні витрати. Порівняно сумарні витрати для двох альтернативних варіантів реалізації системи.

На основі розрахунку коефіцієнтів техніко-економічного рівня визначено, що перший варіант реалізації (на базі Python, PostgreSQL, REST API та інтерактивної візуалізації) є оптимальним, оскільки забезпечує найкраще співвідношення між рівнем технічної якості та витратами на реалізацію.

Таким чином, виконане дослідження дозволило обґрунтовано визначити ефективну архітектуру програмного забезпечення для моделювання енергетичних систем, що відповідає сучасним вимогам до екологічності, точності, масштабованості та економічної ефективності. Отримані результати можуть бути використані як база для подальшого впровадження програмного продукту у практику управління енергетикою на базі ВДЕ.

ВИСНОВКИ

Виходячи з аналізу сучасного стану світової та української відновлюваної енергетики, класифікації й технічних особливостей гібридних енергетичних систем (ГЕС), огляду чисельних методів моделювання та порівняння спеціалізованого програмного забезпечення, можна констатувати таке. По-перше, глобальний та національний ринки ВДЕ перейшли у фазу стійкого масштабування: щорічне зростання світових потужностей перевищує пів теравата, а Україна, попри воєнні втрати, декларує досягнення 50 % «зеленої» генерації у 2035 р., що робить ВДЕ стратегічною основою післявоєнної відбудови та енергетичної незалежності країни. По-друге, домінування змінних джерел (PV, ВЕС) разом із потребою підвищити надійність живлення обумовлює перехід від монотехнологічних рішень до комплексних ГЕС із вбудованими накопичувачами енергії; саме комбінування відновлюваних і традиційних генераторів у паралельно-послідовних архітектурах забезпечує оптимальний баланс гнучкості, ефективності та стійкості системи. По-третє, достовірне проектування та експлуатаційне управління ВДЕ-комплексами неможливі без коректного математичного опису багатофізичних процесів. Для завдань різної складності та масштабу доцільно застосовувати гібридні обчислювальні підходи, що інтегрують класичні сіткові методи (FDM, FEM, FVM) з імовірнісними (Monte Carlo) й оптимізаційними/машинно-навчальними алгоритмами, дозволяючи одночасно враховувати фізику процесів та стохастичний характер погодних і ринкових факторів. По-четверте, огляд програмних інструментів демонструє відсутність універсального ПЗ для всіх завдань: економічну оптимізацію конфігурації найдоцільніше виконувати у HOMER Pro чи SAM; високоточне прогнозування PV-генерації — у PVsyst; електротехнічний аналіз інтеграції ВДЕ-потужностей у мережу — у PowerFactory чи PSS/E; динамічне моделювання мікромереж та розробку алгоритмів керування — у

Matlab/Simulink або TRNSYS. Отже, комплексна методологія дослідження та розробки ВДЕ-систем має ґрунтуватися на багаторівневій інтеграції різних класів моделей і програмних середовищ, а також на поступовому переході від концептуальних techno-economic оцінок до детального мультидисциплінарного інженерного аналізу. Саме такий підхід забезпечує коректну оцінку технічної реалізованості, економічної доцільності та мережевої сумісності проєктів, що є критично важливим для досягнення задекларованих цілей сталого розвитку та декарбонізації енергетичного сектору України й світу.

Було здійснено комплексне моделювання фотовольтаїчних систем із залученням сучасного математичного апарату, чисельних методів та архітектурно-інтегрованих програмних рішень. Розроблений програмний комплекс «solar_model» продемонстрував високу функціональну спроможність щодо імітації енергетичних процесів у сонячних електроустановках на основі кліматичних, астрономічних та технічних параметрів. Теоретична частина роботи забезпечила глибоке розуміння фізичних засад фотогальванічного перетворення, особливостей теплових і оптичних втрат, а також впливу зовнішніх факторів на ефективність систем. Математичні моделі, що охоплюють електричну схему однодіодного типу, нестационарну теплопровідність та стохастичну генерацію погодних сценаріїв, забезпечили достовірне відтворення динаміки вироблення енергії у часових інтервалах від годин до років.

Програмна реалізація на мові Python з використанням бібліотек NumPy, SciPy, Matplotlib, а також архітектурні принципи чистого коду (clean architecture) та модульної декомпозиції, забезпечили високу адаптивність і масштабованість розробки. Інтеграція алгоритмів Монте-Карло, методу Кранка–Ніколсона, Ньютона-Рафсона та оптимізації Левенберга–Маркуардта дозволила не лише провести чисельне моделювання, але й забезпечити пошук оптимальних конфігурацій за критерієм мінімізації умовної вартості

електроенергії (LCOE). Практичне тестування програми підтвердило її працездатність: система адекватно реагує на зміни кліматичних і експлуатаційних умов, коректно моделює добові й сезонні профілі інсоляції та потужності, надає обґрунтовані рекомендації щодо орієнтації панелей.

У ході експериментальних досліджень було виявлено високий рівень узгодженості результатів моделювання з теоретичними очікуваннями та фактичними кліматичними спостереженнями. Запропонований підхід забезпечує високу точність, модульність і відтворюваність розрахунків, а також потенціал до подальшого розширення – зокрема, впровадження двохосового трекінгу, систем акумулювання енергії або алгоритмів реального часу з оперттям на API метеоданих.

Таким чином, мета дипломної роботи досягнута повністю: розроблений програмний продукт продемонстрував практичну ефективність і наукову обґрунтованість, дозволив поглибити професійні компетентності в галузі математичного моделювання, чисельної інженерії та енергетичного аналізу, а також сформував прикладний інструмент для оптимізації параметрів роботи сонячних електростанцій у реальних кліматичних умовах.

Узагальнюючи результати третього розділу, можна стверджувати, що обґрунтована підготовка середовища розробки, раціонально спроектований робочий процес моделювання та отримані експериментальні дані сформували цілісну, відтворювану і технологічно зрілу основу програмного комплексу «solar_model». Від початкової інтеграції 64-розрядної ОС Ubuntu 22.04 LTS, Python 3.11 і контейнеризації через Docker до впровадження CI-конвеєра GitHub Actions із суворою статичною перевіркою та автоматичним формуванням образів було забезпечено повну ізоляцію залежностей і детермінованість збирання. Це, у свою чергу, гарантує, що будь-який учасник команди одержує ідентичне виконуваче середовище, уникає конфліктів бібліотек і може відтворити чисельні експерименти без додаткових ручних налаштувань.

З точки зору архітектурної логіки, замкнене обчислювальне коло «клімат → тепло → електрика → економіка» дає змогу відстежити повний ланцюг перетворень енергії та негайно відображати вплив будь-якої зміни початкових параметрів на кінцевий LCOE. Поєднання детермінованих фізичних моделей з адаптивними стохастичними компонентами та квазі-Ньютонівською оптимізацією утворює гнучкий інструмент, здатний оперативно підлаштовувати геометричні й керувальні параметри ПВ-масиву під локальні кліматичні умови. Вбудований механізм контролю збіжності та автоматичне корегування часового кроку забезпечують чисельну стабільність навіть за екстремальних вхідних сценаріїв.

Експериментальна апробація підтвердила достовірність обчислень: у сприятливих літніх умовах модель відтворює типові добові профілі виробітку, а в зимових сценаріях із сильним снігом коректно фіксує різке падіння генерації й логічно зміщує оптимальний кут панелей до майже вертикального положення. Лінійний градієнт температури, отриманий методом скінченних елементів, співвідноситься з заданими граничними умовами, що вказує на правильність реалізації теплової підсхеми. Водночас виявлені недоліки — відсутність валідації введених даних, необхідність удосконалення візуалізації та розмежування масштабів графіків — не впливають на точність основних обчислень, але потребують уваги для підвищення ергономіки й стійкості софтверного рішення.

Отже, розроблений програмний комплекс задовольняє сучасні вимоги до наукових інструментів енергетичного моделювання: він відтворюваний, масштабований, модульний і придатний для інтеграції як у дослідницькі, так і у виробничі процеси. Подальший розвиток доцільно спрямувати на розширення пакету юніт-тестів, реалізацію повноцінного механізму обробки помилок введення, інтеграцію асинхронних обчислень для багатоядерних або GPU-систем, а також на створення веб-інтерфейсу з динамічними дашбордами для неформалізованих користувачів. Реалізація цих кроків дозволить не лише поглибити наукову валідність моделі, а й перетворити

«solar_model» на повноцінний інструмент підтримки прийняття рішень для широкого кола фахівців у галузі відновлюваної енергетики.

Було виконано комплексний функціонально-вартісний аналіз програмного забезпечення solar_model, що моделює роботу сонячних енергетичних систем. На основі аналізу можна зробити такі висновки: ФВА спрямований на підвищення якості та корисності програмного комплексу solar_model при оптимальних витратах. Об'єктом дослідження стали основні функції та характеристики ПЗ в контексті його використання для проектування фотоелектричних станцій. Обґрунтовано вибір шести ключових параметрів (точність, швидкодія, модульність, зручність інтерфейсу, масштабованість, вартість розробки), які найбільш суттєво впливають на успіх програмного продукту. Експертним шляхом визначено вагомість цих критеріїв; найважливішими виявилися точність моделювання та продуктивність, а також (дещо меншою мірою) вартість розробки. Проаналізовано варіанти реалізації основних функцій – інтерфейсу (CLI vs GUI) та розрахункового алгоритму (спрощений vs детальний). Методом морфологічного аналізу і побудови позитивно-негативної матриці оцінено переваги й недоліки кожного варіанту. Наявність зручного графічного інтерфейсу і використання детальної моделі були визначені як бажані характеристики, незважаючи на збільшення складності розробки. Оцінено трудомісткість та грошові витрати на реалізацію двох інтегрованих варіантів ПЗ – базового (CLI+простий алгоритм) та покращеного (GUI+детальний алгоритм). Базовий варіант виявився майже вдвічі дешевшим у розробці, проте поступається покращеному у потенційних вигодах від використання. Проведено аналіз окупності інвестицій: встановлено, що покращений варіант може окупитися і принести більший економічний ефект у випадку багаторазового застосування для різних проектів, тоді як базовий варіант має обмежену віддачу. На основі багатокритеріальної оцінки (метод зважених балів) перевагу надано варіанту з GUI та детальним алгоритмом. Цей варіант забезпечує найкращий баланс між якістю функцій і витратами: значно

підвищує точність та зручність роботи користувача, помірно погіршуючи показники швидкодії та вартості, причому вагомість перших факторів переважає. Техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність вибору саме цього варіанту для реалізації *solar_model*, оскільки він максимізує цінність продукту для кінцевих користувачів (інженерів, аналітиків) і має перспективи окупності при масштабному впровадженні.

Застосування функціонально-вартісного аналізу дозволило обґрунтовано підійти до вибору архітектури та функцій програмного забезпечення. В результаті проведеного дослідження, розроблено рекомендації щодо реалізації *solar_model*, які поєднують високий рівень якості (точність, ефективність, зручність) з прийнятними витратами. Отримані висновки стануть основою для практичної реалізації проекту та забезпечення його конкурентоспроможності на ринку програмних продуктів для відновлюваної енергетики.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гудима А. М., Солдатенко О. Ю. Основи проектування сонячних енергетичних систем. Київ: Наукова думка, 2021. 248 с.
2. Гулик В. М., Савицький О. Ю. Математичне моделювання фотоелектричних систем: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 312 с.
3. Івасишин Р. Д., Плотніков М. М. Математичне моделювання в енергетиці: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Фоліант, 2018. 228 с.
4. Ільїн В. А., Куриленко І. А. Програмування мовою Python: алгоритми та моделі. Київ: Ліра-К, 2021. 384 с.
5. Кулик О. А. Методи оптимізації в енергетиці: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2020. 140 с.
6. Федоренко І. О., Бондар В. В. Чисельні методи в електроенергетиці: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2019. 196 с.
7. Яковлєв О. І., Яковлєва Т. О. Основи чисельного аналізу: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2022. 248 с.
8. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. – 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 928 p.
9. Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2nd ed. Boston: Academic Press, 2014. 840 p.
10. Masters G. M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013. 720 p.
11. Cabrera-Escobar R., Vera D., Cabrera-Escobar J. et al. Finite Element Analysis Method Design and Simulation of Fins for Cooling a Monocrystalline Photovoltaic Panel. *Clean Technol.* 2024. Vol. 6, No. 2. P. 767–783.
12. Bodini N., Optis M. Operational-based annual energy production uncertainty: are its components actually uncorrelated?. *Wind Energy Science.* 2020. Vol. 5. P. 1435–1448.

13. Wang X., You L., Zhou S. Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. *Appl. Sci.* 2025. Vol. 15, No. 4. 1744
14. Benti N. E., Chaka M. D., Semie A. G. Forecasting Renewable Energy Generation with Machine Learning and Deep Learning: Current Advances and Future Prospects. *Sustainability.* 2023. Vol. 15, No. 9. 7087.
15. Yu S., You L., Zhou S. A Review of Optimization Modeling and Solution Methods in Renewable Energy Systems. *Front. Eng. Manag.* 2023. Vol. 10. P. 640–671
16. Савчин О. П. Функціонально-вартісний аналіз : навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2021. 312 с.
17. Saaty T. L. Decision making for leaders: The Analytic Hierarchy Process for decisions in a complex world. 3rd ed. Pittsburgh : RWS Publications, 2012. 451 p.
18. Kendall M. G. Rank correlation methods. 4th ed. London : Griffin, 1970. 202 p.
19. Шостак В. Д. Економіка програмного забезпечення та інформаційних систем. Київ : КНЕУ, 2019. 280 с.
20. Бабій В. М. Методичні основи функціонально-вартісного аналізу в IT-проєктах. Системні дослідження та інформаційні технології. 2023. № 2. С. 45–60.
21. International Energy Agency. PV technology roadmap. Paris : IEA Publications, 2021. 48 p. URL: <https://iea.org/reports/pv-technology-roadmap> (дата звернення: 29.05.2025).
22. National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell Efficiency Chart. Golden, CO : NREL, 2024. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення: 29.05.2025).
23. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models. Geneva : ISO, 2011. 33 p.

24. [10] Шиманський Б. А. Методи оцінювання економічної ефективності сонячних електростанцій // Енергетика та електрифікація. 2022. № 5. С. 21–29.

ДОДАТОК А. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

```

gui_app.py

import tkinter as tk

from tkinter import ttk, messagebox

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

import datetime


from weather_generator import generate_temperature, generate_insolation

from model import calculate_efficiency, calculate_power,
calculate_sun_angle_realistic

from utils import calculate_daily_energy

from optimize import optimize_tilt_angle_newton

from thermal_model import finite_element_temperature


def get_sun_hours(month):

    daylight_ranges = {

        "january": (8, 16), "february": (7, 17), "march": (6, 18),

        "april": (6, 19), "may": (5, 20), "june": (5, 21),

        "july": (5, 21), "august": (6, 20), "september": (6, 19),

        "october": (7, 18), "november": (7, 17), "december": (8, 16)

    }

    return daylight_ranges.get(month, (6, 18))


class SolarApp:

    def __init__(self, root):

        self.root = root

        self.root.title("Сонячна енергосистема – симуляція")

        self.graph_data = {}

        self.create_widgets()

    def create_widgets(self):

```

```

main_frame = ttk.Frame(self.root)
main_frame.pack(fill="both", expand=True)

left_frame = ttk.Frame(main_frame)
left_frame.pack(side="left", fill="y", padx=10, pady=10)

right_frame = ttk.Frame(main_frame)
right_frame.pack(side="right", fill="both", expand=True, padx=10,
pady=10)

self.inputs = {}
fields = [
    ("День року (1-365)", "133"),
    ("Географічна широта", "50.27"),
    ("Площа панелі (м²)", "1.9"),
    ("Кількість панелей", "93"),
    ("Температура о 6:00 (°C)", "0.4"),
    ("Макс. інсоляція (Вт/м²)", "910")
]
for label, default in fields:
    ttk.Label(left_frame, text=label).pack(anchor="w")
    entry = ttk.Entry(left_frame)
    entry.insert(0, default)
    entry.pack(fill="x")
    self.inputs[label] = entry

ttk.Label(left_frame, text="Місяць").pack(anchor="w")
self.month_combo = ttk.Combobox(left_frame, values=[
    "january", "february", "march", "april", "may", "june",
    "july", "august", "september", "october", "november", "december"
])
self.month_combo.set("may")
self.month_combo.pack(fill="x")

ttk.Label(left_frame, text="Тип опадів").pack(anchor="w")
self.precip_combo = ttk.Combobox(left_frame, values=[

```

```

        "none", "light_rain", "heavy_rain", "light_snow", "heavy_snow",
        "fog"

    ])

    self.precip_combo.set("light_rain")
    self.precip_combo.pack(fill="x")

    ttk.Label(left_frame, text="Тип неба").pack(anchor="w")

    self.sky_combo = ttk.Combobox(left_frame, values=["clear",
        "partly_cloudy", "cloudy"])

    self.sky_combo.set("partly_cloudy")
    self.sky_combo.pack(fill="x")

    ttk.Label(left_frame, text="Режим часу").pack(anchor="w")

    self.time_mode = tk.StringVar(value="auto")

    ttk.Radiobutton(left_frame, text="Автоматичний",
        variable=self.time_mode, value="auto").pack(anchor="w")

    ttk.Radiobutton(left_frame, text="Ручний", variable=self.time_mode,
        value="manual").pack(anchor="w")

    self.start_hour_entry = ttk.Entry(left_frame)
    self.start_hour_entry.insert(0, "9")
    self.start_hour_entry.pack(fill="x")

    self.end_hour_entry = ttk.Entry(left_frame)
    self.end_hour_entry.insert(0, "17")
    self.end_hour_entry.pack(fill="x")

    ttk.Button(left_frame, text="Запустити моделювання",
        command=self.run_simulation).pack(pady=5)

    ttk.Button(left_frame, text="Зберегти результати",
        command=self.save_results).pack(pady=5)

    self.output = tk.Text(right_frame, height=30, width=80)
    self.output.pack(fill="both", expand=True)

    def run_simulation(self):
        try:
            day = int(self.inputs["День року (1-365)"].get())
            lat = float(self.inputs["Географічна широта"].get())

```

```

area = float(self.inputs["Площа панелі (м²)"].get())
count = int(self.inputs["Кількість панелей"].get())
A = area * count
T6 = float(self.inputs["Температура о 6:00 (°C)"].get())
G_max = float(self.inputs["Макс. інсоляція (Вт/м²)"].get())
month = self.month_combo.get()
precip = self.precip_combo.get()
sky = self.sky_combo.get()

cloud_coverage = {"clear": 0.0, "partly_cloudy": 0.3, "cloudy":
0.7}.get(sky, 0.3)

if self.time_mode.get() == "manual":
    h1 = int(self.start_hour_entry.get())
    h2 = int(self.end_hour_entry.get())
    hours = np.arange(h1, h2 + 1)
else:
    h1, h2 = get_sun_hours(month)
    hours = np.arange(h1, h2 + 1)

T_day = generate_temperature(hours, T6, month, precip)
G_day = generate_insolation(hours, G_max, cloud_coverage, precip,
month)

theta_rad = calculate_sun_angle_realistic(hours, day, lat)
eta_T = calculate_efficiency(T_day)
P_day = calculate_power(eta_T, A, G_day, theta_rad)
E_day = calculate_daily_energy(P_day)

best_angle, best_energy = optimize_tilt_angle_newton(hours, A,
T_day, G_day, day, lat)
T_fem = finite_element_temperature(10, 1.6, T_day[0], T_day[-1])

abs_error = abs(best_energy - E_day)
rel_error = abs_error / best_energy * 100 if best_energy != 0 else
0

self.graph_data = {
    "hours": hours,

```

```

        "T_day": T_day,
        "G_day": G_day,
        "P_day": P_day,
        "T_fem": T_fem,
        "x_fem": np.linspace(0, 1.6, 10)
    }

    result = f"""
[Результати]
Загальна енергія: {E_day:.2f} Вт·год
Оптимальний кут: {best_angle:.2f}°
Енергія при оптимальному куті: {best_energy:.2f} Вт·год
Похибка: {rel_error:.2f}% (±{abs_error:.2f} Вт·год)
Температурний розподіл (FEM):
""" + "\n".join([f"Вузел {i+1}: {T:.2f} °C" for i, T in enumerate(T_fem)])

    self.output.delete("1.0", tk.END)
    self.output.insert(tk.END, result)
    self.show_graph_window()

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Помилка", f"Некоректне введення або помилка
обчислень:\n{str(e)}")

def show_graph_window(self):
    win = tk.Toplevel(self.root)
    win.title("Графіки")
    win.geometry("800x600")

    fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(7, 4))
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=win)
    canvas.get_tk_widget().pack(fill="both", expand=True)

    def plot_temp():
        ax1.clear()

```

```

        ax1.plot(self.graph_data["hours"], self.graph_data["T_day"],
color="orange", label="Температура")

        ax1.set_title("Температура")

        ax1.set_xlabel("Година")

        ax1.set_ylabel("Температура (°C)")

        ax1.legend(); ax1.grid(); canvas.draw()

def plot_insolation():

    ax1.clear()

    ax1.plot(self.graph_data["hours"], self.graph_data["G_day"],
color="blue", label="Інсоляція")

    ax1.set_title("Інсоляція")

    ax1.set_xlabel("Година")

    ax1.set_ylabel("Вт/м²")

    ax1.legend(); ax1.grid(); canvas.draw()

def plot_power():

    ax1.clear()

    ax1.plot(self.graph_data["hours"], self.graph_data["P_day"],
color="green", label="Потужність")

    ax1.set_title("Потужність")

    ax1.set_xlabel("Година")

    ax1.set_ylabel("Вт")

    ax1.legend(); ax1.grid(); canvas.draw()

def plot_fem():

    ax1.clear()

    ax1.plot(self.graph_data["x_fem"], self.graph_data["T_fem"],
color="purple", label="FEM", marker="o")

    ax1.set_title("Розподіл температури (FEM)")

    ax1.set_xlabel("Довжина панелі (м)")

    ax1.set_ylabel("Температура (°C)")

    ax1.legend(); ax1.grid(); canvas.draw()

def plot_combined():

    ax1.clear()

    ax1.set_title("Температура та Інсоляція")

```

```

        ax1.set_xlabel("Година")
        ax1.set_ylabel("Температура (°C)", color="orange")
        ax1.plot(self.graph_data["hours"], self.graph_data["T_day"],
color="orange", label="Температура")
        ax2 = ax1.twinx()
        ax2.set_ylabel("Інсоляція (Вт/м²)", color="blue")
        ax2.plot(self.graph_data["hours"], self.graph_data["G_day"],
color="blue", label="Інсоляція")
        ax1.grid(); canvas.draw()

    btn_frame = ttk.Frame(win)
    btn_frame.pack(pady=5)

    for name, func in [("Температура", plot_temp), ("Інсоляція",
plot_insolation),
                        ("Потужність", plot_power), ("FEM", plot_fem),
("Комбінований", plot_combined)]:
        ttk.Button(btn_frame, text=name, command=func).pack(side="left",
padx=4)

    plot_temp()

def save_results(self):
    now = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H-%M-%S")
    filename = f"simulation_results_{now}.txt"
    with open(filename, "w", encoding="utf-8") as f:
        f.write(self.output.get("1.0", tk.END))

    messagebox.showinfo("Збережено", f"Результати збережено у
файл:\n{filename}")

if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = SolarApp(root)
    root.mainloop()

main.py
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

```

```

from weather_generator import generate_temperature, generate_insolation
from model import (
    calculate_efficiency,
    calculate_power,
    calculate_sun_angle_realistic
)
from visuals import plot_weather, plot_power
from utils import calculate_daily_energy
from optimize import optimize_tilt_angle_newton
from thermal_model import finite_element_temperature

def get_sun_hours(month):
    daylight_ranges = {
        "january": (8, 16),
        "february": (7, 17),
        "march": (6, 18),
        "april": (6, 19),
        "may": (5, 20),
        "june": (5, 21),
        "july": (5, 21),
        "august": (6, 20),
        "september": (6, 19),
        "october": (7, 18),
        "november": (7, 17),
        "december": (8, 16)
    }
    return daylight_ranges.get(month, (6, 18))

# --- КРОК 1: Місяць та географія
month = input("Оберіть місяць (англійською): ").strip().lower()
day_of_year = int(input("Введіть день року (1-365): "))
latitude = float(input("Введіть географічну широту (наприклад, 49.4): "))

# --- КРОК 2: Вибір часу
print("\nОберіть режим часу:")

```

```

print("1 – Автоматичний (залежно від місяця)")
print("2 – Ввести власноруч (наприклад, з 12:00 до 14:00)")
choice = input("Ваш вибір (1 або 2): ").strip()

if choice == "2":
    start_hour = int(input("Початкова година (від 5 до 21): "))
    end_hour = int(input("Кінцева година (від 5 до 21): "))
    hours = np.arange(start_hour, end_hour + 1)
else:
    start_hour, end_hour = get_sun_hours(month)
    hours = np.arange(start_hour, end_hour + 1)

# --- КРОК 3: Параметри панелі
panel_area = float(input("Введіть площу однієї панелі (м²): "))
n_panels = int(input("Введіть кількість панелей: "))
A = panel_area * n_panels

# --- КРОК 4: Погодні умови
T_morning = float(input("Температура о 6:00 (°C): "))
G_max = float(input("Максимальна інсоляція вдень (Вт/м²): "))

print("\nОберіть тип опадів:")
print("none, light_rain, heavy_rain, light_snow, heavy_snow")
precip_type = input("Ваш вибір: ").strip().lower()

print("\nОберіть тип неба:")
print("clear, partly_cloudy, cloudy")
sky_type = input("Ваш вибір: ").strip().lower()
cloud_coverage = {"clear": 0.0, "partly_cloudy": 0.3, "cloudy": 0.7}.get(sky_type, 0.3)

# --- КРОК 5: Генерація температури та інсоляції
T_day = generate_temperature(hours, T_morning, month, precip_type)
G_day = generate_insolation(hours, G_max, cloud_coverage, precip_type, month)

# --- КРОК 6: Розрахунок сонячного кута

```

```

theta_rad = calculate_sun_angle_realistic(hours, day_of_year, latitude)

# --- КРОК 7: Розрахунки
eta_T = calculate_efficiency(T_day)
P_day = calculate_power(eta_T, A, G_day, theta_rad)

plot_weather(hours, T_day, G_day)
plot_power(hours, P_day)

# --- КРОК 8: Добова енергія
E_day = calculate_daily_energy(P_day)
print(f"\nЗагальна енергія: {E_day:.2f} Вт·год")

# --- КРОК 9: Оптимізація
best_angle, best_energy = optimize_tilt_angle_newton(
    hours, A, T_day, G_day, day_of_year, latitude)
print(f"\n[Оптимізація кута]")
print(f"Оптимальний кут: {best_angle:.2f}°")
print(f"Енергія при цьому куті: {best_energy:.2f} Вт·год")

# --- КРОК 10: FEM-модель
T_distribution = finite_element_temperature(10, 1.6, T_day[0], T_day[-1])
print("\nРозподіл температури по панелі (FEM):")
for i, T in enumerate(T_distribution):
    print(f"Вузол {i+1}: {T:.2f} °C")

plt.figure(figsize=(6, 4))
x = np.linspace(0, 1.6, 10)
plt.plot(x, T_distribution, marker='o', color='orange')
plt.title("Температурний розподіл (FEM)")
plt.xlabel("Довжина панелі (м)")
plt.ylabel("Температура (°C)")
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

```

model.py

import numpy as np

# Сталі
ETA_REF = 0.18
BETA = 0.004
T_REF = 25

def calculate_efficiency(T):
    return ETA_REF * (1 - BETA * (T - T_REF))

def calculate_sun_angle_realistic(hours, day_of_year, latitude_deg):
    """
    Розрахунок кута між поверхнею панелі та сонячним променем.
    Враховуються:
    - година (локальний час)
    - день року (1-365)
    - географічна широта

    Повертає масив кутів у радіанах.
    """
    lat_rad = np.radians(latitude_deg)

    # Деклінація Сонця
    decl_rad = np.radians(23.45 * np.sin(np.radians(360 * (284 + day_of_year) /
    365)))

    # Годинний кут (в градусах)
    hour_angle_deg = 15 * (hours - 12)
    hour_angle_rad = np.radians(hour_angle_deg)

    # Косинус кута між нормаллю до панелі і променем
    cos_theta = np.sin(lat_rad) * np.sin(decl_rad) + np.cos(lat_rad) *
    np.cos(decl_rad) * np.cos(hour_angle_rad)

    cos_theta = np.clip(cos_theta, 0, 1) # не може бути від'ємним у цій моделі

```

```

# Повертаємо theta в радіанах через арккосинус
theta_rad = np.arccos(cos_theta)

return theta_rad

def calculate_power(eta_T, A, G, theta_rad):
    return eta_T * A * G * np.cos(theta_rad)

def cauchy_method(f, y0, t):
    y = np.zeros(len(t))
    y[0] = y0
    for i in range(1, len(t)):
        dt = t[i] - t[i-1]
        k1 = f(t[i-1], y[i-1])
        k2 = f(t[i], y[i-1] + dt * k1)
        y[i] = y[i-1] + dt * 0.5 * (k1 + k2)
    return y

def runge_kutta_4(f, y0, t):
    y = np.zeros(len(t))
    y[0] = y0
    for i in range(1, len(t)):
        dt = t[i] - t[i-1]
        ti = t[i-1]
        yi = y[i-1]
        k1 = f(ti, yi)
        k2 = f(ti + dt/2, yi + dt * k1 / 2)
        k3 = f(ti + dt/2, yi + dt * k2 / 2)
        k4 = f(ti + dt, yi + dt * k3)
        y[i] = yi + (dt / 6) * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)
    return y

optimize.py

import numpy as np

from scipy.optimize import minimize_scalar

from model import calculate_efficiency, calculate_power,
calculate_sun_angle_realistic

```

```

from utils import calculate_daily_energy

def energy_by_angle(theta_deg, hours, A, T_day, G_day, day_of_year, latitude):
    """
    Обчислення добової енергії при заданому куті нахилу (в градусах).
    """
    theta_rad_panel = np.radians(theta_deg)
    theta_sun_rad = calculate_sun_angle_realistic(hours, day_of_year, latitude)

    eta_T = calculate_efficiency(T_day)

    # Кут між нормаллю до панелі та напрямком на Сонце:
    incident_angle = theta_sun_rad - theta_rad_panel
    incident_angle = np.clip(incident_angle, 0, np.pi/2)

    P_day = calculate_power(eta_T, A, G_day, incident_angle)
    return -calculate_daily_energy(P_day)

def optimize_tilt_angle_newton(hours, A, T_day, G_day, day_of_year, latitude):
    """
    Оптимізація кута нахилу панелі (в градусах) методом Ньютона.
    """
    result = minimize_scalar(
        energy_by_angle,
        bounds=(0, 90),
        args=(hours, A, T_day, G_day, day_of_year, latitude),
        method='bounded',
        options={'xatol': 1e-3}
    )

    if result.success:
        best_angle = result.x
        best_energy = -result.fun
        return best_angle, best_energy
    else:

```

```

        raise RuntimeError("Не вдалося знайти оптимальний кут: " +
result.message)

thermal_model.py

import numpy as np

from utils import tridiagonal_solver # Підключення методу прогонки

def finite_element_temperature(n_nodes, L, T_left, T_right, q=0, k=200):
    """
    Спрощений 1D метод скінченних елементів для стаціонарної теплопередачі
    з використанням методу прогонки для тридіагональної системи.

    Parameters:
    - n_nodes: кількість вузлів
    - L: довжина панелі (м)
    - T_left: температура зліва (°C)
    - T_right: температура справа (°C)
    - q: внутрішнє джерело тепла (Вт/м³)
    - k: теплопровідність матеріалу (Вт/м·К)

    Returns:
    - T: масив температур у вузлах (°C)
    """
    dx = L / (n_nodes - 1)
    N = n_nodes

    # Формуємо тридіагональну систему
    a = np.full(N, k / dx**2)      # нижня діагональ
    b = np.full(N, -2 * k / dx**2) # головна діагональ
    c = np.full(N, k / dx**2)      # верхня діагональ
    d = np.full(N, -q)             # права частина

    # Граничні умови (Діріхле)
    b[0] = 1
    c[0] = 0
    d[0] = T_left

```

```

a[-1] = 0
b[-1] = 1
d[-1] = T_right

# Використовуємо метод прогонки
T = tridiagonal_solver(a, b, c, d)
return T

utils.py
import numpy as np

def calculate_daily_energy(P_day, dt=1, method="rectangle"):
    """
    Обчислює добову вироблену енергію шляхом чисельного інтегрування.

    Parameters:
    - P_day: масив потужності (Вт)
    - dt: часовий крок (год), за замовчуванням 1 год
    - method: метод інтегрування ("rectangle" або "trapezoid")

    Returns:
    - Енергія в Вт·год (Wh)
    """
    if method == "trapezoid":
        return np.trapz(P_day, dx=dt)
    return np.sum(P_day) * dt # метод прямокутників за замовчуванням

def tridiagonal_solver(a, b, c, d):
    """
    Метод прогонки для розв'язання тридіагональної системи рівнянь:
    
$$a[i] * x[i-1] + b[i] * x[i] + c[i] * x[i+1] = d[i]$$


    Parameters:
    - a: нижня діагональ (масив, довжина n)
    - b: головна діагональ (масив, довжина n)

```

```
- c: верхня діагональ (масив, довжина n)
- d: праві частини (масив, довжина n)
```

Returns:

```
- x: розв'язок системи (масив, довжина n)
"""
n = len(d)
alpha = np.zeros(n)
beta = np.zeros(n)
x = np.zeros(n)

# Перший крок
alpha[0] = -c[0] / b[0]
beta[0] = d[0] / b[0]

# Прямий хід
for i in range(1, n):
    denom = b[i] + a[i] * alpha[i-1]
    if i < n - 1:
        alpha[i] = -c[i] / denom
        beta[i] = (d[i] - a[i] * beta[i-1]) / denom

# Зворотній хід
x[-1] = beta[-1]
for i in reversed(range(n - 1)):
    x[i] = alpha[i] * x[i+1] + beta[i]

return x
```

visuals.py

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def plot_weather(hours, T_day, G_day):
```

```
    """
```

```
    Побудова графіків температури та інсоляції протягом дня.
```

```
    """
```

```

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.plot(hours, T_day, label='Температура (°C)', color='orange',
marker='o')

plt.plot(hours, G_day, label='Інсоляція (Вт/м²)', color='blue', marker='s')

plt.xlabel('Година')

plt.title('Температура та інсоляція протягом дня')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.tight_layout()

plt.show()

```

```

def plot_power(hours, P_day):
    """
    Побудова графіка потужності сонячної панелі.
    """
    plt.figure(figsize=(10, 5))
    plt.plot(hours, P_day, label='Потужність (Вт)', color='green', marker='^')
    plt.xlabel('Година')
    plt.ylabel('Потужність (Вт)')
    plt.title('Потужність сонячної панелі протягом дня')
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.show()

```

weather_generator.py

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def month_to_season_factors(month):
    month = month.lower()
    season_factors = {
        "december": (0.5, -10),
        "january": (0.5, -10),
        "february": (0.6, -8),

```

```

        "march":      (0.7, -3),
        "april":      (0.8, 0),
        "may":        (0.9, 3),
        "june":       (1.0, 5),
        "july":       (1.0, 6),
        "august":     (0.95, 4),
        "september": (0.85, 1),
        "october":    (0.7, -2),
        "november":   (0.6, -6)
    }

    return season_factors.get(month, (0.75, 0))

def generate_insolation(hours, G_max, cloud_coverage, precip_type, month):
    season_factor, _ = month_to_season_factors(month)
    clear_sky = G_max * (1 - ((hours - 12) / 6) ** 2)
    cloud_effect = 1 - cloud_coverage

    reduction_map = {
        "none": 1.0,
        "light_rain": 0.7,
        "heavy_rain": 0.5,
        "light_snow": 0.6,
        "heavy_snow": 0.4,
        "fog": 0.5
    }

    precip_effect = reduction_map.get(precip_type, 1.0)
    return clear_sky * cloud_effect * precip_effect * season_factor

def generate_temperature(hours, T_base, month, precip_type):
    _, season_offset = month_to_season_factors(month)
    temp = T_base + 10 * (1 - ((hours - 15) / 9) ** 2)

    penalty_map = {
        "none": 0,
        "light_rain": 2,
        "heavy_rain": 3.5,

```

```

        "light_snow": 2,
        "heavy_snow": 4,
        "fog": 1.5
    }

    penalty = penalty_map.get(precip_type, 0)

    return temp + season_offset - penalty

def monte_carlo_weather_simulation(days=3, G_max=1000, T_base=5,
month="january"):
    """
    Генерує погодні дані на декілька днів з використанням методу Монте-Карло.
    """
    all_hours = []
    all_insolation = []
    all_temperature = []

    possible_precip_types = ["none", "light_rain", "heavy_rain", "light_snow",
"heavy_snow", "fog"]

    for day in range(days):
        hours = np.arange(6, 19)
        cloud_coverage = np.random.uniform(0.0, 0.8)

def monte_carlo_weather_simulation(days=3, G_max=1000, T_base=5,
month="january"):
    """
    Генерує погодні дані на декілька днів з урахуванням сезону для більш
    реалістичного моделювання.
    """
    all_hours = []
    all_insolation = []
    all_temperature = []

    # Розподіл за сезонами
    winter = ["december", "january", "february"]
    spring = ["march", "april", "may"]
    summer = ["june", "july", "august"]

```

```

autumn = ["september", "october", "november"]

    if month in winter:
        precip_types = ["none", "light_snow", "heavy_snow", "fog",
"light_rain", "heavy_rain"]
        probs =          [0.2,      0.3,          0.2,          0.2,      0.05,
0.05]
        elif month in spring:
            precip_types = ["none", "light_rain", "heavy_rain", "light_snow",
"fog"]
            probs =          [0.4,      0.3,          0.15,          0.1,          0.05]
        elif month in summer:
            precip_types = ["none", "light_rain", "heavy_rain", "fog"]
            probs =          [0.6,      0.2,          0.15,          0.05]
        else: # autumn
            precip_types = ["none", "light_rain", "heavy_rain", "fog",
"light_snow"]
            probs =          [0.3,      0.3,          0.2,          0.1,      0.1]

    for day in range(days):
        hours = np.arange(6, 19)
        cloud_coverage = np.random.uniform(0.0, 0.8)

        precip_type = np.random.choice(precip_types, p=probs)

        G_day = generate_insolation(hours, G_max, cloud_coverage, precip_type,
month)

        T_day = generate_temperature(hours, T_base, month, precip_type)

        all_hours.extend(hours + day * 24)
        all_insolation.extend(G_day)
        all_temperature.extend(T_day)

    return np.array(all_hours), np.array(all_insolation),
np.array(all_temperature)

```

ДОДАТОК Б. ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Підготувала:

Студентка групи КА-15 Гордійчук Анастасія Олександрівна

Науковий керівник: професор, д.т.н. Дмитрієва Ольга Анатоліївна

1

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

В умовах нестабільної ситуації в Україні та світі важливо ефективно оцінювати енергетичні системи.

- Часто відсутні повні статистичні дані — моделювання частково компенсує цей недолік.
- Використання чисельних методів дозволяє підвищити точність аналізу та прогнозування.
- Тема є актуальною для забезпечення енергетичної незалежності та оптимізації ВДЕ.



2

Мета і завдання дослідження

Мета роботи:

Розробка програмного комплексу для імітаційного моделювання і оптимізації роботи сонячної фотоелектричної установки з метою підвищення точності прогнозування енергетичного виробітку та ефективності конфігурації системи.

Основні завдання:

1. Аналіз сучасних методів моделювання сонячних систем.
2. Побудова математичної моделі на основі температури, інсоляції та географічних параметрів.
3. Реалізація чисельних методів: метод Ньютона, метод прогонки, FEM, Монте-Карло.
4. Побудова графічного інтерфейсу.
5. Оптимізація параметрів і аналіз похибок.

3

ОБ'ЄКТ І ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження:

Процеси моделювання поведінки енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії в умовах реального кліматичного впливу.

Предмет дослідження:

Обчислювальні методи для реалізації неявних розрахункових схем підвищеної точності і методи стохастичного моделювання, що використовуються для симуляції процесів генерування електроенергії у фотогальванічних модулях з урахуванням теплових, оптичних, кліматичних та економічних чинників.

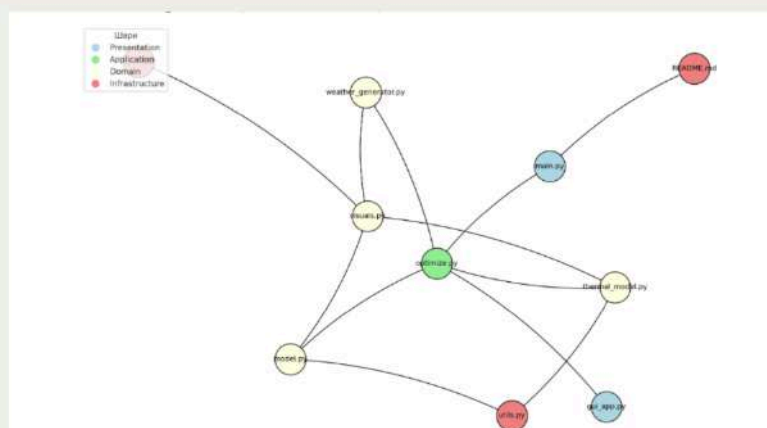
4

РОЗРОБЛЕНИЙ ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ

- Програмне забезпечення реалізовано мовою Python з використанням середовища PyCharm.
- Складається з двох основних частин:
 1. Модуль моделювання та оптимізації:
 - Включає чисельні методи: метод Монте-Карло, метод Ньютона, метод скінченних елементів.
 - Реалізує обчислення ефективності, сонячного кута, потужності та добової енергії.
 - Передбачено оптимізацію кута нахилу панелі для максимальної продуктивності.
 2. Графічний інтерфейс користувача (GUI):
 - Реалізований за допомогою бібліотеки tkinter з інтеграцією matplotlib.
 - Дозволяє користувачу вводити дані (місяць, погодні умови, інсоляція, інше).
 - Після запуску моделювання відкривається вікно з результатами та динамічними графіками.
 - Графіки відображають: температуру, інсоляцію, потужність, температурний розподіл (FEM).
- Програмний продукт дозволяє аналізувати вплив погодних умов на роботу сонячних панелей та оцінити добову продуктивність системи.

5

СХЕМА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «SOLAR_MODEL»



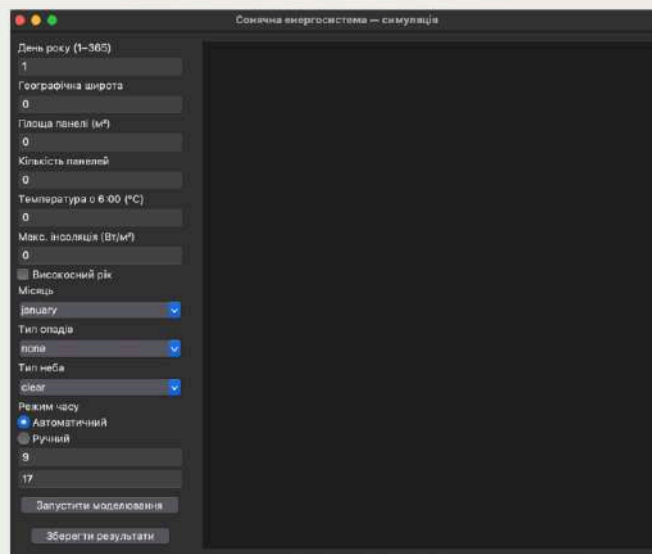
6

ТЕСТОВІ ВХІДНІ ДАНІ

Параметр	Значення
Місяць	June
День року(1-365/366)	172
Географічна широта	50.00°
Температура о 6:00	15°
Тип неба	clear
Тип опадів	none
Максимальна інсоляція	1000 Вт/м ²
Площа однієї панелі	2 м ²
Кількість панелей	10

7

ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС



8

МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУВАЛИСЬ

- **Метод Ньютона** — для знаходження оптимального кута нахилу панелей.
- **Метод прогонки** — для розв'язання систем лінійних рівнянь (FEM).
- **Метод скінченних елементів (FEM)** — температурний розподіл по панелі.
- **Метод Монте-Карло** — генерація погодних умов.
- **Методи чисельної інтеграції** — для розрахунку добової енергії.

9

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

[Результати]

Загальна енергія: 21158.97 Вт·год

Оптимальний кут: 19.62°

Енергія при оптимальному куті: 22463.60 Вт·год

Похибка: 5.81% (± 1304.63 Вт·год)

Температурний розподіл (FEM):

Вузол 1: 17.00 °C

Вузол 2: 17.89 °C

Вузол 3: 18.78 °C

Вузол 4: 19.67 °C

Вузол 5: 20.56 °C

Вузол 6: 21.44 °C

Вузол 7: 22.33 °C

Вузол 8: 23.22 °C

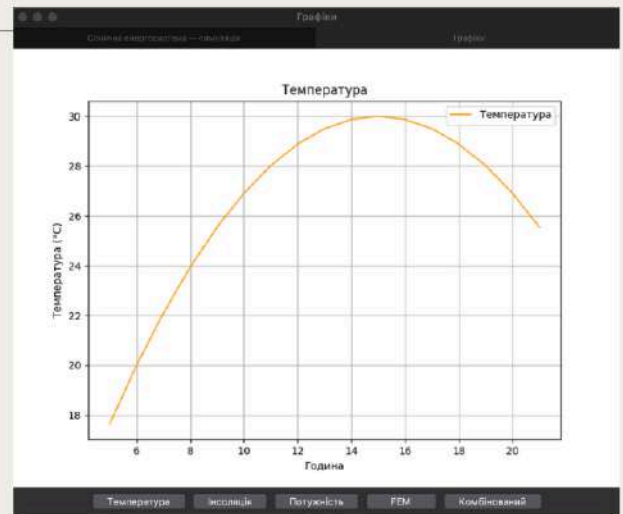
Вузол 9: 24.11 °C

Вузол 10: 25.00 °C

10

ГРАФІКИ (РЕЗУЛЬТАТИ)

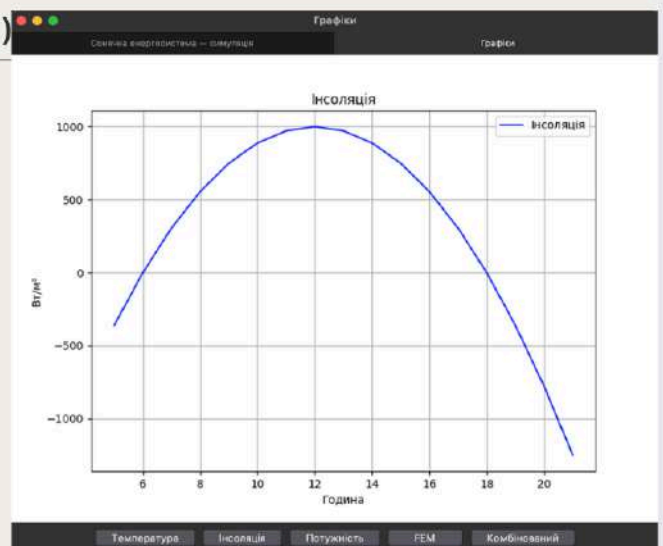
Температура



11

ГРАФІКИ (РЕЗУЛЬТАТИ)

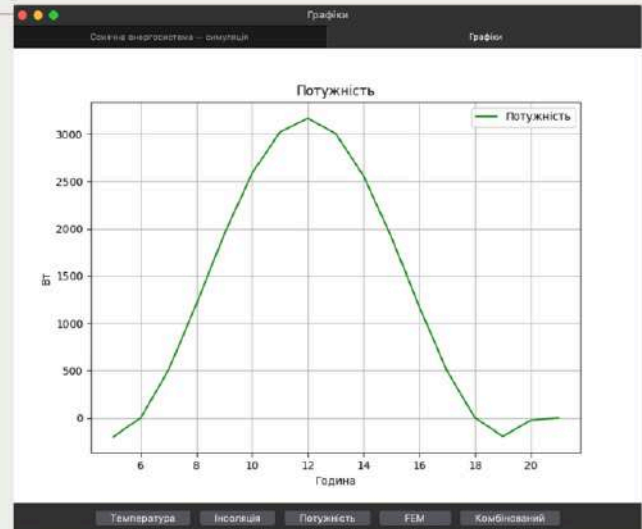
Інсоляція



12

ГРАФІКИ (РЕЗУЛЬТАТИ)

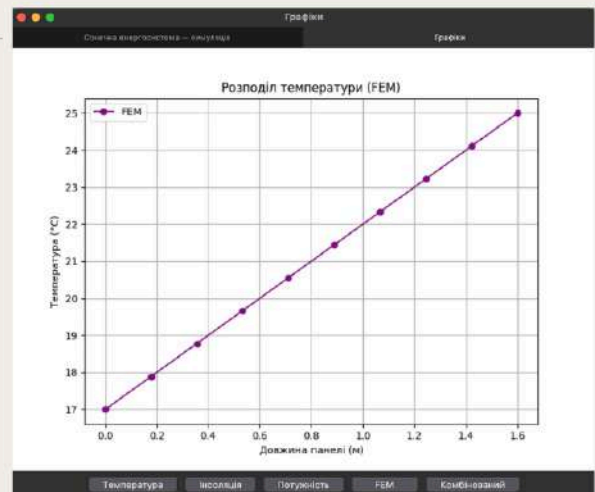
Потужність



13

ГРАФІКИ (РЕЗУЛЬТАТИ)

Розподіл температури



ВИСНОВКИ

- Проведено моделювання енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з використанням чисельних методів (скінченних елементів, Монте-Карло, Рунге-Кутта тощо).
- Розроблено програмний продукт `solar_model`, який реалізує повний цикл: від генерації погодних умов до оцінки продуктивності системи.
- Модель дозволяє обчислювати добову енергію, оптимізувати кут нахилу панелей, аналізувати температурний розподіл (FEM).
- Результати підтверджують ефективність моделювання для планування та оптимізації ВДЕ-систем.
- Програма може використовуватись у навчальних і прикладних цілях.

МОЖЛИВІ ПОКРАЩЕННЯ

Шляхи вдосконалення програмного продукту:

- Реалізувати більш зручну перевірку введених даних (перевірка типів, діапазонів, повідомлення про помилки).
- Забезпечити крос-платформенність та можливість запуску як standalone-додатку.
- Розширити набір сценаріїв погоди та регіональних параметрів.

Дякую за увагу