

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ІМІТАЦІЙНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Здобувача вищої освіти
Денякова Олега Олександровича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та
робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
ст. викл. Фуртат О.В.

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
 Навчально-науковий інститут муніципального управління
 та міського господарства
 Кафедра Інженерних систем та технологій
 Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
 Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
 робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Завідувач кафедри
 _____ Наталія ОМЕЦІНСЬКА
 « ____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Денякову Олегу Олександровичу

1. Тема роботи: Розроблення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання і оптимізації роботи сонячної фотоелектричної установки

керівник роботи: ст.викл. Фуртат О.В.

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
 від «7» листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2026

3. Вихідні дані до роботи: Еквівалентна однодіодна схема фотоелектричного перетворювача; диференціальне рівняння теплопровідності; статистичні метеорологічні дані (ТМУ); обчислювальні алгоритми та методи чисельного інтегрування; мова програмування Python.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати поточний стан та існуючі програмні рішення для імітаційного моделювання сонячних фотоелектричних систем; Розробити комплексну математичну модель СФЕУ, яка враховує електричні, теплові та кліматичні параметри; Спроектувати архітектуру автоматизованого програмного комплексу та реалізувати алгоритми оптимізації кута нахилу панелей; Провести серію чисельних експериментів для верифікації моделі та розробити заходи з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	старший викладач Олена ФУРТАТ		
Розділ 2	старший викладач Олена ФУРТАТ		
Розділ 3	старший викладач Олена ФУРТАТ		
Розділ 4	старший викладач Олена ФУРТАТ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВСТУП.....	08
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	10
1.1. Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та світі	10
1.2. Гібридні енергетичні системи: класифікація, архітектури, технічні особливості	19
1.3. Чисельні методи, що застосовуються у моделюванні ВДЕ-систем	26
1.4. Аналіз існуючих програмних рішень для симуляції та оптимізації ВДЕ-комплексів	30
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА АРХІТЕКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ.....	44
2.1. Фізичні основи фотогальванічного перетворення	44
2.2. Кліматичні та астрономічні передумови розрахунку інсоляції	46
2.3. Математичні моделі системи	49
2.4. Чисельні методи, реалізовані у програмі	52
2.5. Архітектура програмного комплексу	55
Висновки до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ.....	62
3.1. Підготовка середовища розробки	62
3.2. Робочий процес моделювання	63
3.3. Експериментальні результати	66
Висновки до розділу 3.....	69
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	71
4.1 Опис робочого місця програміста	71
4.2 Освітленість робочого столу.....	74
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	75
Висновки до розділу 4.....	77
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

АНОТАЦІЯ

Деняков О. О. Розроблення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання і оптимізації роботи сонячної фотоелектричної установки. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено сучасний стан та існуючі програмні рішення для моделювання систем відновлюваної енергетики, розроблено комплексну математичну модель сонячної фотоелектричної установки, яка об'єднує електричні, теплові та кліматичні параметри. Запропоновано архітектуру та програмно реалізовано мовою Python автоматизований комплекс імітаційного моделювання. Для аналізу впроваджено сучасні чисельні методи: одновимірний метод скінченних елементів (1D FEM) для вирішення теплових задач, алгоритм матричної прогонки, метод Ньютона для просторової оптимізації кута нахилу панелей та алгоритми Монте-Карло для імовірного прогнозування. Виконано експериментальні симуляції, за результатами яких розраховано добові профілі інсоляції, температурні градієнти та знайдено оптимальний кут нахилу панелей, що дозволило підвищити розрахунковий енерговиріток. Практичне значення полягає у можливості безпосереднього використання розробленого інструменту для проєктування та експлуатаційного аналізу сонячних електростанцій і зниження вартості згенерованої енергії.

Об'єкт дослідження – процеси генерування, перетворення та розподілу електричної енергії в сонячній фотоелектричній установці при змінних метеорологічних умовах.

Предмет дослідження – методи імітаційного моделювання, алгоритми автоматизованого керування та оптимізації параметрів сонячної фотоелектричної установки.

Мета роботи – розроблення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання та оптимізації функціонування сонячної фотоелектричної установки для підвищення її техніко-економічної ефективності.

Методи дослідження – математичне та імітаційне моделювання, чисельні методи обчислень (метод скінченних елементів, метод прогонки, алгоритм Ньютона), стохастичне прогнозування (метод Монте-Карло).

Ключові слова: сонячна фотоелектрична установка, імітаційне моделювання, математична модель, оптимізація, чисельні методи, Python, відновлювана енергетика.

ABSTRACT

Denyakov O. O. Development of an automated complex for simulation modeling and optimization of the operation of a solar photovoltaic installation. – Manuscript.

Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – Tavrichesky National University named after V.I. Vernadsky, Kyiv, 2026.

The bachelor's qualification work investigated the current state and existing software solutions for modeling renewable energy systems, developed a comprehensive mathematical model of a solar photovoltaic installation, which combines electrical, thermal and climatic parameters. The architecture was proposed and an automated simulation modeling complex was implemented in Python. Modern numerical methods were implemented for the analysis: one-dimensional finite element method (1D FEM) for solving thermal problems, matrix sweep algorithm, Newton's method for spatial optimization of the panel tilt angle, and Monte Carlo algorithms for probabilistic forecasting. Experimental simulations were performed, based on the results of which daily insolation profiles, temperature gradients were calculated, and the optimal panel tilt angle was found, which allowed to increase the calculated energy production. The practical significance lies in the possibility of direct use of the developed tool for design and operational analysis of solar power plants and reduction of the cost of generated energy.

The object of research is the processes of generation, conversion and distribution of electrical energy in a solar photovoltaic installation under variable meteorological conditions.

The subject of the research is simulation modeling methods, algorithms for automated control and optimization of solar photovoltaic installation parameters. The purpose of the work is to develop an automated complex for simulation modeling and optimization of the functioning of a solar photovoltaic installation to increase its technical and economic efficiency.

Research methods – mathematical and simulation modeling, numerical calculation methods (finite element method, run-in method, Newton's algorithm), stochastic forecasting (Monte Carlo method).

Keywords: solar photovoltaic installation, simulation modeling, mathematical model, optimization, numerical methods, Python, renewable energy.

ВСТУП

Світова спільнота все активніше інтегрує екологічно чисті технології в енергетичний сектор, що викликано необхідністю виконання глобальних кліматичних зобов'язань та зміцненням енергетичної безпеки країн. Для України це питання набуло критичного значення через збройну агресію РФ, системні атаки на критичну інфраструктуру та різке подорожчання традиційного палива. Тому розвиток сонячної фотоелектричної енергетики, інтегрованої в локальні та регіональні мережі, є ключовим інструментом декарбонізації та зменшення імпортозалежності. Ефективне використання сонячних фотоелектричних установок (СФЕУ) ускладнюється високою стохастичністю сонячної радіації, що потребує впровадження ефективних інструментів для їх моделювання та керування.

У відповідь на ці виклики сучасна наука приділяє значну увагу створенню автоматизованих інструментів імітаційного моделювання та оптимізації роботи СФЕУ. Це дозволяє здійснювати всебічний аналіз нелінійних фізичних процесів, що відбуваються в сонячних установках при змінних метеорологічних умовах, і розробляти стратегії керування, спрямовані на підвищення ефективності функціонування таких систем. Таким чином, тема бакалаврської роботи «Розроблення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання і оптимізації роботи сонячної фотоелектричної установки» є науково і практично актуальною.

Метою роботи є розроблення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання та оптимізації функціонування сонячної фотоелектричної установки для підвищення її техніко-економічної ефективності.

Об'єктом дослідження виступають процеси генерування, перетворення та розподілу електричної енергії в сонячній фотоелектричній установці при змінних метеорологічних умовах.

Предметом дослідження є методи імітаційного моделювання, алгоритми автоматизованого керування та оптимізації параметрів сонячної фотоелектричної установки.

Для досягнення мети передбачено виконання таких дослідницьких завдань: по-перше, проаналізувати поточний стан та перспективні підходи до імітаційного моделювання сонячних фотоелектричних систем, визначивши ключові проблеми їх проектування та експлуатації; по-друге, розробити імітаційну математичну модель СФЕУ, яка враховує динаміку сонячного випромінювання, вплив температури на ефективність фотоелектричних модулів та технічні характеристики обладнання; по-третє, створити алгоритми автоматизованого керування роботою СФЕУ, включаючи відстеження точки максимальної потужності та координацію роботи з навантаженням; по-четверте, виконати багатокритеріальну оптимізацію параметрів та режимів роботи СФЕУ, зокрема кута нахилу панелей, вибору обладнання та алгоритмів керування, з метою максимізації виробітку енергії та мінімізації втрат; по-п'яте, провести серію імітаційних експериментів для типових метеорологічних умов України, щоб оцінити ефективність роботи СФЕУ та розроблених алгоритмів, і сформулювати практичні рекомендації.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в удосконаленні методів імітаційного моделювання СФЕУ шляхом інтеграції динамічних моделей фотомодулів з автоматизованими алгоритмами оптимізації режиму роботи в реальному часі. Також, в межах дослідження вперше для вітчизняних ґрунтово-кліматичних регіонів розроблено адаптивний алгоритм автоматизованого керування СФЕУ для забезпечення її ефективності в реальному часі при змінних метеоумовах.

Практична значущість одержаних результатів та розробленого автоматизованого комплексу полягає в можливості безпосереднього використання отриманих результатів при проектуванні та експлуатації промислових та локальних СФЕУ. Це забезпечить підвищення коефіцієнта корисного використання встановленої потужності СФЕУ на 8–12 %, скорочення питомих рівнів втрат електричної енергії до 15 % та зменшення викидів CO₂ на 25–30 % у порівнянні з традиційними схемами енергопостачання аналогічної потужності.

Теоретичною основою дослідження слугують методи математичного

моделювання, імітаційного моделювання та оптимізації. Для реалізації автоматизованого комплексу використовуються середовища імітаційного моделювання (наприклад, MATLAB/Simulink або Python PVLib), що дозволяє створювати динамічні моделі компонентів СФЕУ. Для оптимізації параметрів СФЕУ застосовуються генетичні алгоритми.

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі узагальнено світовий та вітчизняний досвід використання сонячної фотоелектричної енергетики, описано теоретичні основи імітаційного моделювання таких систем та виконано огляд існуючих автоматизованих рішень. Другий розділ присвячено постановці задачі, розробці імітаційної математичної моделі компонентів СФЕУ та алгоритмів автоматизованого керування і оптимізації. Третій розділ містить опис реалізації автоматизованого комплексу, результати імітаційного моделювання, аналіз оптимізованих параметрів та практичні рекомендації. 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 сонячної енергії шляхом створення та застосування автоматизованого комплексу імітаційного моделювання та оптимізації. Отримані результати становитимуть науково-методичний доробок, що може бути використаний у навчальному процесі, в інженерній практиці та у сфері стратегічного планування енергетичного розвитку.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1. Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та світі

Початок третього десятиліття XXI століття характеризується стрімким та безпрецедентним розвитком сектору відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на глобальному рівні. Протягом 2022 року питома вага екологічної генерації у світовому балансі виробництва електроенергії наблизилася до позначки у 30 %. Вже наступного, 2023 року, глобальна енергосистема поповнилася рекордними 510 ГВт нових чистих потужностей, що перевищило показники попереднього року наполовину. Історичним кроком стали рішення кліматичного саміту COP28 у Дубаї, де світова спільнота задекларувала намір потроїти загальну встановлену потужність ВДЕ до кінця поточного десятиліття — з орієнтовних 4 210 ГВт у 2023 році до амбітних 11 000 ГВт у 2030 році. Домінуючим драйвером цього зростання залишається сонячна енергетика, яка забезпечила близько 75 % від усіх введених в експлуатацію об'єктів у 2023 році. Географічно абсолютним лідером розгортання зелених технологій виступає Азійський регіон, зокрема Китай, на який припало понад 69 % світового приросту. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), сукупний обсяг відновлюваних потужностей має шанси перетнути межу в 7 300 ГВт вже до 2028 року. Фундаментальним фактором такого успіху є безперервне здешевлення відповідних технологій: статистичні дані свідчать, що у 2023 році понад 81 % масштабних проєктів у сфері зеленої енергетики виявилися економічно вигіднішими за традиційні аналоги, що працюють на викопному паливі [1].

Динаміка вітчизняного енергетичного сектору до початку повномасштабного вторгнення також демонструвала виражений висхідний тренд. Напередодні 2022 року сукупний обсяг інстальованих потужностей ВДЕ в Україні сягав майже 9,9 ГВт. Лівову частку цього обсягу складали сонячні електростанції (близько 6 ГВт) та вітрові парки (орієнтовно 2 ГВт), тоді як решта припадала на об'єкти біоенергетики та малу гідроенергетику. За підсумками 2021 року підприємства відновлюваної енергетики згенерували 12,8 ТВт·год

електроенергії, забезпечивши 8,1 % від загальнодержавного виробітку.

Незважаючи на колосальні втрати та руйнування, спричинені воєнними діями, розвиток екологічної генерації залишається стратегічним імперативом державної політики. Вже у 2023 році внесок ВДЕ у забезпечення потреб країни (разом із генерацією великих гідроелектростанцій) зріс до 22 %. У сучасних надскладних умовах саме децентралізовані відновлювані технології визнаються ключовим інструментом досягнення енергетичної автономності держави. Варто зазначити, що за попередню декаду в розбудову зеленої генерації було залучено понад 12 мільярдів доларів США інвестицій, і очікується, що подальша фінансова підтримка з боку міжнародних партнерів та уряду слугуватиме потужним каталізатором відродження цього сегмента економіки [6].

На сьогодні сонячна фотовольтаїка є найбільш динамічною галуззю світової енергетики. Під кінець 2022 року сумарна встановлена потужність сонячних електростанцій на планеті досягла позначки у 1185 ГВт, причому лише впродовж одного року було додано майже 243 ГВт нових потужностей, що відповідає темпу зростання у 37 % порівняно з 2021 роком. Тенденція збереглася і у 2023 році, коли три чверті всіх новозбудованих об'єктів ВДЕ базувалися саме на технологіях перетворення сонячної радіації. Паралельно фіксується стійке зниження капітальних витрат: середня собівартість генерації електроенергії для нових фотоелектричних проєктів у 2023 році скоротилася орієнтовно на 12 %. Український ринок має винятковий потенціал у цьому напрямі, оскільки рівень інсоляції на території нашої держави варіюється в межах 1100–1500 кВт·год/м², що суттєво перевищує показники низки європейських країн. Станом на 2022 рік вітчизняний парк налічував близько 1400 промислових сонячних станцій різних масштабів сумарною потужністю 6 ГВт. На початку 2024 року саме фотоелектричні установки генерують близько 75 % усієї зеленої електроенергії в Україні (без урахування показників великої гідроенергетики). Окремим важливим вектором є масштабування малих розподілених систем — домашніх станцій, наявність яких суттєво підвищує маневреність та стійкість локальних розподільних мереж.

Другу позицію у глобальному рейтингу відновлюваних технологій впевнено

утримує вітроенергетика. За підсумками 2022 року сукупна встановлена потужність вітрових установок у світі перетнула межу в 906 ГВт, причому протягом року було інстальовано близько 77 ГВт нових сухопутних та офшорних генеруючих об'єктів. Беззаперечним лідером галузі залишається наземна генерація, яка акумулює близько 90 % усіх потужностей, де ключову роль відіграє Китай, що забезпечив майже половину всього світового приросту за 2022 рік. Водночас спостерігається інтенсивний розвиток морських (офшорних) вітропарків, зокрема інноваційних плавучих систем, які активно розгортаються в країнах Європи, Сполучених Штатах Америки та Азії. В Україні до моменту повномасштабного вторгнення успішно функціонувало 34 вітрові електростанції загальною потужністю 2 ГВт, обладнані 699 турбінами. Основні площі забудови були сконцентровані у південних та південно-східних регіонах, де середньорічна швидкість вітру досягає оптимальних 7 м/с. Навіть в умовах війни енергетикам вдалося реалізувати знакові проекти, як-от запуск першої черги Тилігульської ВЕС потужністю 78 МВт у 2023 році. Однак, трагічним наслідком агресії стала окупація та пошкодження близько 80 % вітчизняних вітроенергетичних активів. Відповідно, повоєнна розбудова передбачатиме не лише відновлення втраченого, а й будівництво нових потужних вітрових комплексів, включаючи розкриття колосального потенціалу Чорноморського шельфу [16].

Важливою складовою екологічного переходу є біоенергетика, яка охоплює процеси конверсії твердої біомаси, біогазу, органічних відходів та рідкого біопалива у теплову та електричну енергію. У світовому масштабі цей сектор генерує близько 685 ТВт·год електроенергії, що становить 9 % загального обсягу виробітку з ВДЕ, та домінує у сфері екологічного теплопостачання із часткою понад 90 %. Крім того, біопаливо задовольняє приблизно 3,6 % світових потреб транспортної галузі. Цей напрям високо цінується за здатність до ефективної утилізації сільськогосподарських відходів та підтримки сталого вуглецевого циклу. Україна володіє феноменальною ресурсною базою для розвитку біоенергетичних комплексів: вітчизняний аграрний сектор щорічно продукує десятки мільйонів тонн побічної сировини, включаючи орієнтовно 34 мільйони

тонн відходів зернового виробництва та соломи. Поточна структура української біоенергетики формується переважно за рахунок використання твердої біомаси (близько 70 %), тоді як біогазові установки та виробництво рідкого палива (біоетанолу й біодизеля) займають по 15 % ринку. Попри наявність величезної сировинної бази, рівень практичного освоєння цього потенціалу залишається критично низьким — сумарна потужність діючих об'єктів становить лише 0,2 ГВт. Проте урядові ініціативи спрямовані на стимулювання галузі, адже її розвиток здатний не лише диверсифікувати джерела енергії, а й створити додаткові джерела прибутку для сільських територій.

Історично найбільшим генератором екологічно чистої електроенергії у світі залишається гідроенергетика. Згідно зі звітами Міжнародної асоціації гідроенергетики, станом на кінець 2023 року глобальна потужність гідроелектростанцій сягала вражаючих 1 412 ГВт. На цю галузь припадає ледова частка відновлюваного виробітку (за деякими оцінками, понад 50 %), а гідроакumuлюючі об'єкти (ГАЕС) відіграють монопольну роль у світовій системі зберігання електроенергії, забезпечуючи понад 90 % світових акумулювальних потужностей. Враховуючи жорсткі екологічні, економічні та соціальні бар'єри, спорудження нових масштабних гідровузлів суттєво обмежене, змістивши вектор інвестиційної активності у країни Латинської Америки, Африки та Азії. Для Об'єднаної енергетичної системи України гідрогенерація історично виконує критично важливу функцію маневрування та балансування мережі. До початку війни комплекс включав 10 великих ГЕС із сумарною потужністю 6 ГВт, три ГАЕС та близько півсотні малих станцій, які щорічно генерували 0,2 млрд кВт·год струму. На превеликий жаль, російська збройна агресія завдала нищівного удару по галузі: підрив дамби Каховської ГЕС та систематичні ракетні обстріли інших гідротехнічних споруд призвели до втрати або виведення з експлуатації майже 2,5 ГВт потужностей. У зв'язку з цим нагальними завданнями є капітальна реконструкція пошкоджених об'єктів та глибока модернізація вцілілих вузлів, з перспективою проєктування нових ефективних станцій у післявоєнний період [2].

Сектор геотермальної енергетики суттєво поступається за масштабами

поширення іншим відновлюваним технологіям. Станом на кінець 2023 року глобальні потужності геотермальної електрогенерації оцінювалися лише у межах 16–17 ГВт. Ключовими гравцями на цьому специфічному ринку виступають Сполучені Штати Америки, Філіппіни, Індонезія, Нова Зеландія та Туреччина. Галузь демонструє повільні темпи розвитку, які спираються переважно на буріння глибших високотемпературних свердловин та впровадження новітніх турбін. В Україні потенціал енергії земних надр у контексті генерації електроенергії практично не задіяний. Водночас геологічні дослідження підтверджують наявність перспективних родовищ гарячих підземних вод у західних регіонах (Карпати) та на півдні (Крим). Наявний ресурс відкриває широкі перспективи для розбудови систем теплопостачання та впровадження теплових насосів, хоча реалізація проєктів глибокої геотермії на вітчизняних теренах поки що відсутня [3].

Загальна світова статистика яскраво ілюструє домінування чистої енергетики. У 2022 році електростанції на базі ВДЕ виробили понад 8 500 ТВт·год енергії, що становить близько 30 % світового обсягу. Сукупні глобальні потужності у 2023 році перевищили рубіж у 4 200 ГВт. Структурно цей показник розподілився так: гідроенергетика — близько 1 412 ГВт, сонячні станції — 1 185 ГВт, вітроенергетика — 906 ГВт, геотермальні об'єкти — 16 ГВт, а комплекси на біомасі склали кілька сотень гігават. Аналіз динаміки показує, що у 2022 році було додано 470 ГВт нових одиниць (зокрема 243 ГВт фотовольтаїки, 77 ГВт вітру та 22 ГВт гідро), а вже 2023 рік ознаменувався абсолютним рекордом у 510 ГВт, три чверті з яких припали на сонце. Фінансове підґрунтя такої експансії забезпечили рекордні інвестиції: за 2023 рік у чисту енергетику (включно із сонцем, вітром, воднем та електромобілями) було вкладено 1,77 трильйона доларів США. При цьому Китай інвестував колосальні 676 мільярдів доларів, що становить 38 % від загальносвітових капіталовкладень.

Повертаючись до українських реалій, слід зазначити, що наприкінці 2021 року загальнонаціональна потужність екологічної генерації (разом із домашніми СЕС) оцінювалася у 9,66 ГВт. Із цього обсягу лівова частка належала сонячним станціям (6 ГВт), вітропаркам (2 ГВт) та об'єктам біоенергетики (0,2 ГВт), які

спільно виробили 12,8 ТВт·год зеленого струму. Через війну ці індикатори знизилися, і до початку 2024 року функціонуюча інфраструктура скоротилася до 8,7 ГВт. Попри це, навіть протягом складного 2023 року енергосистема поповнилася новими об'єктами сонячної (близько 500 МВт) та вітрової (182 МВт) генерації. Безумовно, основу вітчизняного енергобалансу продовжують формувати потужності атомних, теплових та гідроелектростанцій, проте питома вага ВДЕ зростає і за підсумками 2023 року досягла 22 % (разом з великими ГЕС). Цьому сприяло планомірне вдосконалення регуляторної бази: запровадження реєстрів, запуск прозорих аукціонів та організація моніторингу чистої енергії [11].

Науково-технічний прогрес відіграє вирішальну роль у підвищенні ефективності ВДЕ. У сегменті сонячної енергетики фокус зміщується на розробку багатошарових напівпровідникових структур (перовськітів), масове впровадження двосторонніх біфасіальних модулів та використання інструментарію машинного навчання для оптимізації роботи панелей. Вітроенергетична галузь активно нарощує одиничну потужність турбін до 8–15 МВт і більше, освоює плавучі платформи для морських станцій та застосовує інноваційні аеродинамічні обтічники в комплексі з датчиками LiDAR для точнішого прогнозування генерації. Паралельно біоенергетика трансформується завдяки впровадженню передових біогазових реакторів, технологій газифікації відходів та синтезу нового біопалива.

Оскільки частка мінливої генерації невпинно зростає, критичної ваги набувають системи зберігання енергії та їх інтеграція в мережу. Головним інфраструктурним пріоритетом на 2024–2025 роки є розгортання акумуляторних батарей (літій-іонних, натрієвих, твердотільних) та використання гідроакумуляторів. Завдяки масштабуванню виробництва, саме літій-іонні комірки залишаються найпоширенішим і найдешевшим способом зберігання. Водночас активно розгортаються технології Power-to-X, що передбачають перетворення надлишкового зеленого струму на водень шляхом електролізу з його подальшим використанням у паливних елементах або для створення синтетичного палива. Невід'ємною складовою сучасної інфраструктури є

концепція розумних мереж, яка забезпечує автоматизоване управління, двосторонній зв'язок між вузлами генерації та споживачами, а також формування автономних мікромереж для живлення критичних об'єктів [13].

Серед ключових технічних рішень для балансування абсолютне лідерство зберігають літій-іонні комплекси та ГАЕС. Проте паралельно досліджуються флоумережеві (зокрема ванадієві) батареї та складні водневі накопичувачі. Модернізуються алгоритми прогнозування виробітку енергії, а сучасні інвертори забезпечують додаткову стабільність мережі. Впроваджуються нові підходи до управління попитом та технології інтеграції електротранспорту. На додаток до традиційних кремнієвих елементів розвиваються органічні фотоелементи та сонячні концентратори. Вітроенергетика застосовує активні системи управління кутом атаки лопатей та керування потоком. У біоенергетиці акцент робиться на комплексній утилізації відходів аграрного, лісового секторів та органічного сміття для отримання біогазу й твердого палива, а також на створенні компактних когенераційних установок для опалення невеликих населених пунктів [5].

Формування сприятливого середовища для зеленої генерації нерозривно пов'язане з якісною державною політикою та міжнародними угодами. Після підписання Паризької угоди та резолюцій наступних кліматичних самітів уряди багатьох держав прийняли амбітні цілі. Зокрема, Європейський Союз погодив підвищення частки ВДЕ у загальному споживанні до 42,5 % до 2030 року (з потенціалом до 45 %). Китайський план розвитку передбачає досягнення 33 % екологічної генерації електроенергії до 2025 року. Сполучені Штати у 2022 році ухвалили закон IRA, який суттєво розширив податкові пільги для вітро-сонячної генерації та систем зберігання. Паралельно працюють міжнародні фінансові механізми: кліматичні фонди та платформи (наприклад, Just Energy Transition) інвестують у декарбонізацію країн із високою вугільною залежністю. Незважаючи на загальне зростання світових інвестицій у чисту енергетику, аналітики відзначають критичну проблему: країни з перехідною економікою відчують гострий дефіцит капіталу, що гальмує глобальний перехід [4].

В Україні розвиток сектору регламентується ключовими державними

документами. Національний план з енергетики та клімату заклав цілі зеленого переходу, згідно з якими до 2035 року 50 % електроенергії має вироблятися з ВДЕ, а інші 50 % — атомними станціями. Створено правовий фундамент для функціонування зеленого тарифу (який у 2024 році для сонячної енергії становить 0,117 євро за кВт·год), пріоритетного підключення до мереж та торгівлі зеленими сертифікатами. Залучено низку програм підтримки: державні інвестиції, кредитні гарантії ЄБРР, податкові преференції для виробників обладнання. До початку повномасштабної війни у галузь було вкладено понад 12 мільярдів доларів, а навіть у 2023 році обсяг інвестицій лише в сонячні проєкти склав близько 150 мільйонів доларів. Сьогодні нагальним є фінансування відбудови зруйнованих об'єктів та комплексної розбудови магістральних мереж. Важливим кроком також є синхронізація енергоринку з європейським законодавством, що відкриває шлях до спільного торгового простору та нових кредитних ліній [11].

Інтеграція зростаючих обсягів мінливої генерації створює виклики для стабільності енергосистем. У періоди надлишкового виробництва диспетчери змушені примусово обмежувати відпуск зеленої енергії (curtailment). Наприклад, у 2022 році в Німеччині з цих причин було втрачено близько 5,4 ТВт·год вітрової енергії. Ця проблема гостро підкреслює необхідність будівництва потужних систем акумулювання та впровадження гнучких балансуєчих рішень. Відсутність таких маневрових інструментів суттєво гальмує подальше розгортання ВДЕ в умовах змінного попиту.

Не менш складною є проблематика фінансового забезпечення та стабільності державної підтримки. Дефіцит доступного фінансування залишається ключовим бар'єром для масштабування ВДЕ. Будь-які зміни законодавства, коливання зелених тарифів або затримки з виплатами можуть різко погіршити інвестиційний клімат. Український ринок свого часу зіткнувся з накопиченням значних боргів перед виробниками чистої енергії, що тимчасово сповільнило розвиток сектору. Відповідно, формування прозорих довгострокових правил гри, гарантування повернення інвестицій та доступ до міжнародного капіталу є критичними передумовами стабільного зростання [8].

Повномасштабна військова агресія з боку Росії яскраво продемонструвала вразливість централізованої енергосистеми. За даними експертів, протягом 2022–2023 років було втрачено або окуповано майже половину генеруючих потужностей України, а весна 2024 року принесла додаткові руйнування ТЕС та ГЕС обсягом близько 9 ГВт. Знищення Каховського гідровузла та пошкодження інших станцій призвели до втрати 45 % гідропотужностей (близько 2,5 ГВт). Ці трагічні події доводять, що нова енергетична архітектура повинна базуватися на децентралізованих, територіально розосереджених та захищених установках ВДЕ, що потребує негайного відновлення мереж та інтеграції резервних систем накопичення в постраждалих регіонах.

Крім технічних аспектів, процеси впровадження ВДЕ іноді стикаються із соціальними та екологічними бар'єрами. Будівництво масштабних об'єктів може викликати опір місцевих громад через земельні питання, візуальний вплив вітротурбін або зміну екосистем при спорудженні ГЕС. Розвиток біоенергетики порушує питання раціонального використання земель і конкуренції за аграрну сировину з продовольчим сектором. Паралельно відчувається нестача кваліфікованих інженерних кадрів та локальних потужностей для виготовлення обладнання. Вирішення цих суперечностей вимагає проведення екологічних експертиз, впровадження соціальних програм та розвитку вітчизняної виробничої бази [9].

Аналізуючи перспективи відновлюваної енергетики, фахівці глобальних інституцій схиляються до дуже оптимістичних прогнозів. Базові сценарії вказують на те, що сектор ВДЕ залишиться найдинамічнішим, і вже у найближчі роки зелена генерація випередить вугілля як головне джерело енергії. Виконання цілей саміту COP28 щодо потроєння потужностей до 2030 року сприятиме масштабній трансформації світової економіки. Постійне здешевлення технологій стимулюватиме розробку комплексних гібридних систем (поєднання сонячних, вітрових модулів та акумуляторів), масштабування зеленого водню та міжсекторальну інтеграцію, зокрема електрифікацію транспорту.

Для України відновлювана енергетика безальтернативно стане основою повоєнної відбудови та модернізації всього комплексу. Затверджені урядові цілі

— 50 % ВДЕ до 2035 року та досягнення вуглецевої нейтральності до 2060 року
— формують чітку довгострокову стратегію. Замість відновлення застарілих теплових станцій інвестиції будуть спрямовані у розбудову сучасних сонячних парків на півдні, вітроферм та біоенергетичних вузлів. Потужна міжнародна підтримка, яка включає гранти, зелені кредити та цільові програми допомоги, робить цю галузь вкрай перспективною для інвесторів [22].

Підсумовуючи вищенаведене, можна стверджувати, що глобальний перехід до відновлюваної енергетики є стійким і незворотним процесом. Завдяки цілеспрямованій політиці та рекордним інвестиціям зелена генерація незабаром займе домінуючу позицію у світовому виробництві електроенергії. Для України стратегічним завданням є максимальне використання цієї глобальної тенденції під час повоєнної відбудови для формування стійкої, децентралізованої та енергонезалежної економіки.

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

Під поняттям «гібридна енергетична система» (ГЕС) у сучасній електроенергетиці розуміють інтегрований інфраструктурний комплекс, який акумулює в собі кілька різнотипних джерел генерації для спільного та збалансованого забезпечення споживачів електричною (а іноді й тепловою) енергією. Фактично, це багатокomпонентна апаратна платформа, завданням якої є створення стійкого енергопостачання завдяки синергії різних технологій. У більшості практичних реалізацій базова структура такої системи формується за рахунок поєднання відновлюваних джерел (фотоелектричні модулі, вітрогенератори, біогазові установки) із класичними генераторами, що працюють на органічному паливі, та/або спеціалізованими підсистемами накопичення енергії (електрохімічними батареями, тепловими акумуляторами, водневими комірками). Таке комплексне об'єднання дає змогу нівелювати індивідуальні недоліки кожної окремої технології, водночас максимізуючи їхні сильні сторони, що в підсумку гарантує високу якість струму та безперебійність живлення об'єктів [8].

Фундаментальною метою проєктування гібридних установок є кардинальне підвищення загальної надійності енергомережі та оптимізація витрат первинних енергоресурсів. Завдяки інтелектуальному балансуванню між різними генеруючими вузлами, такі комплекси демонструють значно вищу експлуатаційну стійкість та привабливіші техніко-економічні показники порівняно з моносистемними рішеннями. Синхронізована робота кількох джерел відкриває шлях до суттєвої економії палива: зокрема, імплементація акумуляторних блоків дає змогу акумулювати надлишки екологічно чистої енергії, мінімізуючи час роботи паливних резервних генераторів. Отже, архітектура гібридних систем цілеспрямовано розробляється для забезпечення адаптивного, економічно доцільного та безперервного постачання енергії, що є критично важливим за умов різких стрибків споживчого навантаження або метеорологічної нестабільності відновлюваних джерел.

Конструктивне та схемотехнічне різноманіття гібридних енергокомплексів є надзвичайно широким. Для їх систематизації застосовують багатокритеріальну класифікацію: за фізичною природою первинних джерел, за топологією електричних зв'язків між вузлами, а також за масштабом потужності та цільовим призначенням. Кожен із цих критеріїв дозволяє глибше розкрити специфіку побудови та функціонування конкретної ГЕС [18].

Аналізуючи системи за типами інтегрованих генераторів, виокремлюють повністю відновлювані гібридні комплекси, що базуються виключно на поєднанні двох або більше видів екологічної генерації. Найтиповішими представниками цієї групи є вітро-сонячні, гідро-сонячні та вітро-гідроенергетичні установки. Наприклад, тандем фотоелектричних панелей та вітряків є оптимальним з точки зору добового та сезонного вирівнювання графіка виробітку: за ясної погоди домінує сонячна генерація, тоді як у похмурі або вітряні періоди основне навантаження бере на себе вітрогенератор, згладжуючи загальну криву виробництва. Аналогічний стабілізуючий ефект дає інтеграція біомасових установок із сонячними полями, оскільки керуваність біоенергетики компенсує непередбачуваність погодних факторів, підвищуючи сумарний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи [6].

Поряд із суто екологічними рішеннями, величезний сегмент ринку займають гібриди, що включають традиційні генеруючі потужності. Яскравим прикладом є сонячно-дизельні комплекси, де масив фотомодулів працює в єдиній зв'язці з двигуном внутрішнього згоряння. Алгоритм їхньої роботи передбачає максимальне покриття потреб за рахунок сонця вдень, тоді як дизель-генератор автоматично активується вночі або під час щільної хмарності для запобігання блекауту. Схожим чином функціонують вітро-дизельні та біогазово-дизельні конфігурації. Такий симбіоз дозволяє радикально скоротити витрати вуглеводнів, зберігаючи при цьому стовідсоткову гарантію наявності напруги. До інноваційних напрямів належать ядерно-відновлювальні системи, що передбачають синхронізацію малих модульних реакторів із полями ВДЕ. Сучасні дослідження підтверджують, що такий підхід значно розширює маневрені можливості енергосистеми та подовжує ресурс експлуатації ядерного палива.

Залежно від електричної архітектури (топології), гібридні системи поділяються на послідовні (серійні), паралельні та змішані. Ця градація відображає принципи маршрутизації енергетичних потоків від джерел до кінцевого споживача [9].

Послідовна топологія (серійна архітектура) характеризується тим, що всі енергопотоки проходять через єдиний вузол перетворення. Технічно це реалізується через створення спільної шини постійного струму. Усі генератори (вітротурбіни через випрямлячі, сонячні стрінги через DC-DC конвертери) скидають згенеровану потужність на цю шину, після чого енергія трансформується єдиним центральним інвертором у змінний струм для живлення навантаження. Навіть дизель-генератор у такій схемі може працювати виключно на зарядку акумуляторів. Головним плюсом цього формату є надзвичайна простота диспетчеризації енергопотоків. Проте наявність додаткових каскадів перетворення неминуче призводить до певного зниження загального ККД системи [12].

Паралельна топологія передбачає незалежне підключення всіх генеруючих одиниць до спільної шини змінного струму. Кожен елемент системи

комплектуються власним мережевим перетворювачем або контролером синхронізації, що дозволяє їм паралельно і безпосередньо віддавати струм у мережу. У такій системі інвертор сонячної станції та генератор вітротурбіни працюють одночасно, автоматично розподіляючи навантаження. Ця архітектура вирізняється високим ступенем масштабованості — можна легко додавати нові модулі або виводити старі в ремонт без зупинки комплексу. Однак, вона потребує впровадження високотехнологічних протоколів керування для точного узгодження фаз, частоти та напруги між усіма генераторами.

Комбінована (послідовно-паралельна) архітектура є синтезом двох попередніх підходів і базується на використанні двонапрямних перетворювачів. Вона передбачає наявність як DC-шини (до якої під'єднані батареї та фотомодулі), так і AC-шини (де знаходяться паливні генератори та зміннострумове навантаження). Взаємодія між шинами відбувається через гібридний інвертор. Таке AC/DC рішення є еталоном гнучкості, дозволяючи оптимізувати потоки енергії з мінімальними втратами на перетворення. Саме змішана топологія найчастіше є фундаментом для побудови складних сучасних мікромереж [16].

Якщо розглядати класифікацію за встановленою потужністю та сферою використання, гібридні об'єкти охоплюють спектр від мікросистем до макроенергетичних вузлів: Домогосподарські (приватні) гібридні установки зазвичай обмежені потужністю в кілька десятків кіловат. Їхня структура включає дахові сонячні панелі, інвертор із гібридним функціоналом, блок літєвих або свинцевих акумуляторів та, іноді, резервний паливний двигун. Мета таких проєктів — мінімізація рахунків за електроенергію та створення надійного резерву на випадок аварій у магістральних лініях електропередачі [18]. Комерційні ГЕС середнього масштабу проєктуються для забезпечення потреб аграрних комплексів, торгових центрів, лікарень чи телекомунікаційних станцій. Потужність тут обчислюється сотнями кіловат. Вони гарантують критичне живлення об'єктів та забезпечують швидку окупність завдяки заміщенню дорогої мережевої електроенергії або дизельного пального енергією з ВДЕ. Промислові та муніципальні енергетичні хаби — це гігантські об'єкти мегаватного класу.

Вони поєднують розлогі масиви фотоелементів, вітропарки та індустріальні системи зберігання (від мегаватних батарейних контейнерів до гідроакумуляторів чи сховищ на стисненому повітрі). Ці системи проєктуються для живлення цілих міст або великих заводів, а їхнє впровадження суттєво розвантажує об'єднану енергосистему країни [10].

Окремим, вищим рівнем інтеграції є автономні мікромережі. Це локальні енергосистеми, здатні повноцінно функціонувати в умовах повної ізоляції від магістральних мереж. Вони є рятівним рішенням для віддалених островів, гірських баз чи військових містечок. Архітектура мікромережі включає мікс із ВДЕ, надійні дизельні резерви та масивні акумуляторні парки для покриття цілодобових потреб об'єкта. За статусом підключення вони можуть бути як повністю ізольованими, так і мережевими, які працюють синхронно з великою системою, але при аварії миттєво переходять в «острівний» режим. Резильєнтність (відмовостійкість) є головною рисою мікромереж, що робить їх незамінними для об'єктів критичної інфраструктури [18].

Базові архітектурні концепції також тісно пов'язані з наявністю систем накопичення. Інтеграція акумуляторів (гідроакумуляції, батарей чи водню) перетворює систему на гнучкий інструмент, здатний переносити енергію у часі. Накопичувач виступає буфером: у години пікової генерації сонця акумулятори поглинають зайві кіловати, а під час вечірнього максимуму споживання — плавно їх віддають. Якщо запас вичерпується, система управління коректно запускає дизель. Такий підхід гарантує ідеальну якість струму та оптимізує мотогодини паливних агрегатів, мінімізуючи викиди парникових газів [15].

На противагу їм існують безакумуляторні архітектури. Їхня концепція базується на миттєвому споживанні згенерованої енергії. За відсутності сховища баланс підтримується виключно маневруванням дизель-генератора або перетоками із зовнішньої мережі. Наприклад, якщо сонце заходить за хмару, дизельна установка має за долі секунди наростити оберти, щоб компенсувати провал генерації. Хоча відмова від дорогих батарей зменшує капітальні інвестиції, вона призводить до роботи дизелів у рваних, неефективних режимах, що пришвидшує знос обладнання. Тому масштабні проєкти майже завжди

комплектуються хоча б мінімальним обсягом накопичувачів [2].

Мережеві гібридні комплекси працюють як єдиний організм із центральною енергосистемою. Вони виконують функцію «проз'юмера» (одночасно виробника і споживача). У цій архітектурі сама зовнішня мережа виконує роль гігантського безлімітного акумулятора: туди скидаються надлишки (через механізм «зеленого» тарифу або Net Billing) і звідти ж береться ресурс у разі дефіциту. Обов'язковою умовою тут є наявність мережевих інверторів із функцією анти-острівного захисту, які відключають генерацію при знеструмленні загальної лінії задля безпеки ремонтних бригад. Такі системи є ключовим інструментом декарбонізації промисловості [2].

З іншого боку, автономна (острівна) архітектура вимагає здатності самостійно формувати параметри мережі. В ній обов'язково присутній так званий grid-forming інвертор, який генерує еталонну синусоїду, задаючи напругу та частоту (50 Гц), під які вже підлаштовуються інші вузли. Автономні комплекси проєктуються з високим коефіцієнтом резервування: тут часто дублюються генератори та встановлюються великі акумуляторні масиви на випадок затяжних погодних аномалій. Складні алгоритми управління навантаженням можуть автоматично відключати другорядні прилади (наприклад, підігрів басейну), щоб зберегти енергію для життєво важливих систем (насоси, зв'язок) [7].

Бездоганна робота таких багатограних структур неможлива без трьох технічних стовпів: системи енергоменеджменту, накопичувачів та силової електроніки.

Система управління енергопотоками (EMS) виконує роль інтелектуального ядра ГЕС. Це складний програмно-апаратний комплекс, який у режимі реального часу аналізує поточний стан заряду батарей, прогнози погоди, тарифи та графіки споживання, приймаючи рішення щодо розподілу навантажень. Сучасні EMS використовують методи машинного навчання, нечітку логіку та евристичні алгоритми (наприклад, генетичні алгоритми чи метод рою частинок) для прогнозування та оптимізації. Їхня мета — гарантувати баланс потужності, не допускаючи відхилень частоти при різких змінах генерації вітру чи сонця, що

досягається миттєвою комунікацією між контролерами всіх підсистем [10].

Блок накопичувачів енергії є фундаментом балансування. Найбільшого поширення набули літій-іонні осередки завдяки своїй високій щільності енергії. Специфіка гібридних установок вимагає від батарей витримувати жорсткі циклічні навантаження з глибоким розрядом. Тому їх комплектують системами управління (BMS), які балансують струми між комірками, захищають від температурних перекосів та перезаряду. Для боротьби з короткочасними мілісекундними коливаннями вітрової генерації ідеально підходять суперконденсатори, а для довготривалого сезонного зберігання надлишків перспективним є вектор водневої енергетики (отримання водню через електроліз із подальшим використанням у паливних елементах) [3].

Силова електроніка є технологічним мостом, що перетворює енергію у придатний для використання формат. ГЕС генерує струм різних параметрів: сонце дає DC (постійний струм), вітер — нестабільний AC (змінний струм), дизель — стабільний AC. Для зведення їх до єдиного стандарту використовуються матриці інверторів, конвертерів та випрямлячів. Особливі вимоги висуваються до гібридних двонапрямних інверторів, які повинні миттєво перемикаєти режими заряд/розряд, фільтрувати вищі гармоніки та підтримувати заданий коефіцієнт потужності. Застосування новітніх напівпровідників на базі карбіду кремнію (SiC) дозволяє суттєво підвищити ККД перетворення та надійність цих критичних вузлів [20].

Комплексний підхід до проектування наділяє гібридні системи унікальною гнучкістю. Вони здатні швидко перегруповувати ресурси для реакції на пікові навантаження, згладжуючи споживання з магістральних мереж та підвищуючи проникнення екологічної енергії.

Завдяки оптимізації режимів роботи, ГЕС демонструють безпрецедентну енергоефективність. Система керування утримує дизельні агрегати у зоні їхнього максимального ККД (на рівні 70–80 % номінальної потужності), що дозволяє уникнути перевитрат пального на холостому ході. Відновлювана генерація утилізується практично на 100 %. Загалом, грамотно інтегровані системи здатні скоротити операційні витрати на 20–50 % [9].

Надійність ГЕС базується на принципі резервування та комплементарності.

Відмова одного фотомодуля чи зупинка вітряка компенсується запасом енергії в батареях або включенням паливного генератора. Система релейного захисту локалізує пошкоджені ділянки, а функція «чорного старту» дозволяє мікромережі самостійно відновити роботу після повного блекауту без допомоги ззовні [20].

Підсумовуючи, можна впевнено констатувати, що гібридні енергетичні системи є високотехнологічним, надійним та економічно виправданим рішенням для сучасних викликів. Об'єднання інноваційної силової електроніки, розумних алгоритмів диспетчеризації та екологічних джерел генерації перетворює ГЕС на ключовий елемент переходу до інтелектуальної, стійкої та низьковуглецевої енергетичної архітектури майбутнього.

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

Фундаментом методу скінченних різниць (Finite Difference Method, FDM) є заміна неперервних похідних, що входять до складу диференціальних рівнянь, їхніми дискретними аналогами — різницевиими відношеннями, які обчислюються на заздалегідь сформованій регулярній просторово-часовій сітці. Тобто зміна функції за певною координатою наближено описується через різницю її значень у суміжних вузлових точках. Цей підхід традиційно використовується для розв'язання задач теплопровідності та аналізу хвильових процесів у системах із відносно простою, переважно одновимірною або плоскою геометрією. Головними перевагами FDM є його алгоритмічна прозорість, легкість програмної реалізації та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів під час роботи з одновимірними моделями. Проте метод має й суттєві обмеження: він погано адаптується до складних криволінійних меж досліджуваних областей і вимагає суворого дотримання критеріїв стійкості (наприклад, умови Куранта-Фрідріхса-Леві або критерію Шварцшильда для явних інтеграційних схем). У сфері відновлюваної енергетики скінченно-різницевий апарат успішно застосовують для симуляції температурних полів у ґрунтових масивах або під час розрахунку базових теплових балансів у плоских сонячних колекторах [8].

Своєю чергою, метод скінченних елементів базується на декомпозиції суцільного середовища або складної конструкції на скінченну множину дрібних підобластей (елементів), поведінка яких описується через набір локальних базисних функцій. Завдяки цьому вихідні диференціальні рівняння трансформуються у так звану слабку (інтегральну) форму, зводячись до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. ФЕМ є незамінним інструментом для моделювання об'єктів зі складною просторовою геометрією та гетерогенними фізичними властивостями. Для ВДЕ-систем це означає можливість високоточного аналізу термічних напружень у фотоелектричних модулях або розрахунку механічної міцності та деформацій композитних лопатей вітрогенераторів. Як підтверджують результати дослідження [1], метод скінченних елементів є надзвичайно потужним апаратом у задачах теплопередачі: він здатен максимально достовірно відтворити температурні градієнти всередині багат шарових матеріалів за будь-яких граничних умов. Однак, розплатою за таку універсальність і точність є висока обчислювальна вартість алгоритму, а також необхідність залучення спеціалізованих препроцесорів для генерації якісної та адаптивної розрахункової сітки.

Метод скінченних об'ємів оперує інтегральними формами рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії, які записуються для набору невеликих контрольних об'ємів. Використовуючи фундаментальну теорему Гаусса-Остроградського, об'ємні інтеграли від дивергентних членів перетворюються на поверхневі інтеграли, що описують потоки величин через грані цих об'ємів. Такий підхід гарантує строге виконання законів збереження на локальному рівні для кожної комірки сітки. FVM є галузевим стандартом у сфері обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аеродинамічного проєктування. В контексті відновлюваної енергетики він дозволяє детально візуалізувати турбулентне обтікання вітрових турбін повітряними масами або оптимізувати конвективний тепловідвід у потужних інверторних станціях. Сильною стороною методу є його абсолютна консервативність та здатність працювати з неструктурованими (нерегулярними) сітками, що ідеально підходить для складних 3D-моделей. Водночас серед слабких місць слід виділити ризик виникнення ефектів штучної

(чисельної) дифузії при використанні грубих сіток та складність точної апроксимації потоків на границях комірок.

Для врахування фактора невизначеності широко застосовується метод Монте-Карло — потужний інструмент стохастичного чисельного моделювання. Його суть зводиться до багаторазової генерації випадкових вибірок вхідних параметрів (наприклад, швидкості вітру, рівня інсоляції, ймовірності виходу обладнання з ладу) із подальшим прогоном детермінованої моделі для кожного набору даних. Зібравши великий масив результатів, дослідники отримують статистичний розподіл цільової функції (наприклад, річного виробітку електроенергії), що дає змогу оцінити не лише математичне сподівання, а й довірчі інтервали та ризики. Метод блискуче справляється зі складними ймовірнісними процесами та корельованими змінними, а його алгоритм легко розпаралелюється на багатоядерних кластерах. Основним стримуючим фактором є феноменальна обчислювальна ресурсоемність, оскільки для досягнення статистичної значущості та мінімізації похибки потрібні десятки або й сотні тисяч ітерацій. У проєктуванні гібридних ВДЕ метод Монте-Карло незамінний для оцінки експлуатаційної надійності, прогнозування довгострокової генерації вітропарків та аналізу коливань сонячної активності. Згідно з висновками дослідження [15], цей підхід забезпечує максимально пряму та об'єктивну оцінку невизначеності річного виробітку енергії (AEP), що робить його еталонним для аналізу багатofакторних ризиків.

Окремий і вкрай важливий клас становлять методи математичної оптимізації, покликані знаходити екстремуми цільових функцій (максимізація прибутку або мінімізація втрат) за наявності жорстких технічних та економічних обмежень. У проєктуванні ВДЕ активно використовують лінійне програмування (LP) та змішано-цілочислове лінійне програмування (MILP) для вирішення задач диспетчеризації; нелінійне програмування (NLP) для систем зі складними фізичними залежностями; а також сімейство метаевристичних та еволюційних алгоритмів (наприклад, генетичні алгоритми — GA, метод рою частинок — PSO) для пошуку рішень у дискретних або багатокритеріальних просторах, де аналітичне обчислення градієнтів неможливе. Методи MILP гарантують

знаходження абсолютного оптимуму, проте вимагають штучної лінеаризації нелінійних процесів, що може викривляти фізичну суть явища, а збільшення кількості змінних призводить до експоненційного зростання часу розрахунку. Натомість еволюційні алгоритми чудово адаптуються до будь-яких нелінійностей, але не дають математичної гарантії знаходження глобального оптимуму і потребують тонкого налаштування внутрішніх гіперпараметрів. Їх традиційна ніша — це структурна оптимізація мікромереж, підбір номінальних потужностей сонячних панелей та ємності акумуляторів у гібридних комплексах [8].

Останніми роками революційний вплив на галузь здійснюють методи машинного навчання (МН) — набір передових статистичних алгоритмів, що здатні самостійно виявляти закономірності у великих масивах даних без прямого програмування фізичних законів. У сфері прогнозування генерації домінують алгоритми навчання з учителем (регресійні моделі, штучні нейронні мережі), методи кластеризації (навчання без учителя) та алгоритми навчання з підкріпленням, які застосовуються для розробки інтелектуальних стратегій управління. Ці Data-Driven моделі фіксують складні, глибоко нелінійні зв'язки між вхідними метеорологічними предикторами, технічним станом обладнання та фінальним виробітком енергії. Практика доводить, що застосування ансамблевих дерев рішень (Random Forest, XGBoost) або глибоких нейромереж дозволяє кардинально знизити похибку короткострокового та середньострокового прогнозування сонячної і вітрової генерації порівняно з традиційними ARIMA-моделями. Перевагою МН є надзвичайна адаптивність і здатність обробляти терабайти історичних даних. Серед недоліків — ефект «чорної скриньки» (відсутність прозорої фізичної інтерпретації), гостра залежність від якості навчального датасету та ризик перенавчання моделі. Як зазначається у роботі [9], впровадження інструментарію машинного навчання створює передумови для якісного стрибка в ефективності оперативного диспетчерського керування сучасними інтелектуальними енергосистемами.

З метою нівелювання недоліків окремих підходів, сучасна світова практика все частіше звертається до створення комплексних гібридних моделей. Вони

передбачають глибоку інтеграцію строгих фізико-математичних розрахунків з алгоритмами оптимізації та інструментами штучного інтелекту. Наприклад, так зване «фізико-статистичне» моделювання поєднує виходи чисельних моделей прогнозу погоди з нейромережевими фільтрами для корекції систематичних помилок прогнозу генерації. Ще одним трендом є ко-симуляція, коли апарати FVM та FEM працюють у єдиному циклі з еволюційними оптимізаторами для створення ідеального дизайну обладнання з урахуванням термодинаміки та аеродинаміки. Для вирішення стратегічних завдань використовуються багатокритеріальні алгоритми (зокрема, NSGA-II), що дозволяють знаходити Парето-оптимальні конфігурації ГЕС, збалансовані за критеріями вартості, енергоефективності та екологічної безпеки. Беззаперечно, саме такі синергетичні гібридні моделі, що об'єднують модулі прогнозування, оптимізації та CFD-симуляції, визнаються науковою спільнотою найбільш перспективним та всеосяжним інструментарієм для проєктування відновлюваної енергетики майбутнього.

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

На сьогодні спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання об'єктів відновлюваної енергетики (ВДЕ) є невід'ємним інструментарієм, який дозволяє розв'язувати масштабний комплекс інженерних, аналітичних та економічних завдань на всіх етапах життєвого циклу енергосистем. Базовим етапом є техніко-економічне обґрунтування, що передбачає комплексну оцінку доцільності інтеграції екологічних джерел з погляду фінансової рентабельності та технічної можливості реалізації проєкту. У межах цього процесу здійснюється прецизійний розрахунок потрібних генеруючих потужностей, прогнозується річний обсяг виробітку електроенергії, а також детально калькуюються обсяги капітальних інвестицій та операційних витрат. На основі цих даних формуються ключові фінансові метрики: нормована вартість електроенергії (LCOE), чиста приведена вартість (NPV) та дисконтований період окупності. Завдяки моделюванню проєктувальники отримують змогу зіставити різноманітні сценарії

розвитку подій, щоб обрати ту конфігурацію обладнання, яка гарантує максимальний прибуток або мінімальну собівартість кіловат-години. Саме результати такого глибокого аналізу стають фундаментом для прийняття остаточних інвестиційних рішень.

Наступним надважливим етапом є структурна оптимізація енергосистеми. Цей процес полягає у пошуку ідеальної архітектури гібридного комплексу (балансу між масивами генераторів та ємністю накопичувачів), яка б найкраще відповідала заданим цільовим функціям. Критеріями оптимізації найчастіше виступають мінімізація загальної вартості володіння системою, досягнення максимального відсотка покриття потреб за рахунок чистої енергії або забезпечення безкомпромісної надійності електропостачання. Сучасні обчислювальні комплекси здатні автоматично перебирати тисячі можливих комбінацій обладнання (сонячних інверторів, вітрогенераторів, резервних дизельних установок, батарейних блоків) і симулювати їхню поведінку протягом багатьох років із погодинним або навіть похвилинним кроком. У підсумку алгоритми видають не лише оптимальний склад обладнання (задачу сайзингу), а й формують найбільш ефективні стратегії диспетчерського керування системою (наприклад, оптимальні цикли заряду-розряду акумуляторів чи пріоритетність запуску паливних генераторів) [2].

Окремим напрямом є прецизійний розрахунок генерації та експлуатаційної продуктивності, що базується на імітації фізичних процесів в установках за різних метеорологічних умов. Для фотоелектричних станцій алгоритми враховують масиви погодинних кліматичних даних (рівень прямої та розсіяної інсоляції, температуру навколишнього середовища), просторову орієнтацію модулів, втрати від взаємного затінення рядів та ККД перетворення інверторів. У випадку вітропарків базою для розрахунків слугують профілі вітрового навантаження на певній висоті та аеродинамічні криві потужності конкретних турбін. Такі інструменти прогнозування є критично необхідними для точної оцінки коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП) та розуміння того, як просторове розташування об'єкта вплине на його довгострокову генерацію.

Вагому частку в сучасній інженерії займає моделювання мікромереж — глибока симуляція розподілених енергетичних кластерів, які можуть функціонувати як синхронно з магістральною мережею, так і в повністю ізольованому («острівному») режимі. Віртуальне тестування мікромережі дає змогу візуалізувати часову динаміку перетоків потужності між генераторами та споживачами, проаналізувати реакцію системи на різкі стрибки навантаження чи раптову втрату генерації, а також відпрацювати сценарії аварійного переходу в автономний режим. Ці симуляції є безальтернативним методом для налаштування розумних контролерів та оцінки реальної економії викопного палива [15].

Заключним, але не менш критичним етапом є аналіз динамічної стійкості та параметрів якості електроенергії. Упровадження великих масивів ВДЕ суттєво змінює фізику електромережі. Динамічне моделювання дозволяє дослідити поведінку системи під час перехідних процесів (коротких замикань, відключень потужних ліній або скидання навантаження). Інженери аналізують відхилення частоти, провали напруги та коректність роботи пристроїв релейного захисту. Оскільки сонячні та вітрові електростанції підключаються через силову електроніку (інвертори), виникає ризик генерації вищих гармонік струму та появи флікеру. Спеціалізовані програмні комплекси дозволяють розкласти сигнал на спектр, перевірити рівень нелінійних спотворень (THD) та гарантувати, що об'єкт відповідатиме жорстким стандартам якості електроенергії перед його фізичним приєднанням до Об'єднаної енергосистеми.

Зазвичай перелічені завдання розв'язуються за ітеративним принципом. На стадії техніко-економічного задуму застосовують інструменти для експрес-оцінки та пошуку базової конфігурації. Згодом переходять до глибокого розрахунку енерговиробітку, а фінальним акордом (особливо для мегаватних об'єктів) стає електротехнічне моделювання режимів мережі. Оскільки жодна програма не є абсолютно універсальною, для кожного класу задач використовується свій софт: економіку та сайзинг чудово рахує HOMER, генерацію сонячних полів — PVsyst або SAM, а електромеханічні перехідні процеси — платформи рівня PSS/E чи PowerFactory. Далі наведено розгорнутий

огляд флагманських програмних комплексів, які домінують на ринку проєктування ВДЕ [5].

HOMER Pro (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) — визнаний світовий лідер у сегменті оптимізації гібридних мікромереж. Комплекс, початково створений у стінах Національної лабораторії відновлюваної енергетики США (NREL), спеціалізується на довгостроковій симуляції автономних та підключених до мережі систем із погодинним кроком. Його головна сила полягає в унікальному алгоритмі перебору: програма комбінує сотні варіантів розмірностей фотомодулів, вітряків, дизель-генераторів та батарей, паралельно прораховуючи фінансову модель для кожної конфігурації. На виході користувач отримує ранжований список рішень, де на першому місці знаходиться система з найменшою поведеною вартістю володіння. HOMER вміє враховувати графіки змінних тарифів, штрафи за викиди вуглецю та дозволяє проводити багатовимірний аналіз чутливості (наприклад, як зміна ціни на дизель вплине на доцільність розширення сонячного парку). Сьогодні це власницьке комерційне ПЗ (розробник HOMER Energy by UL), яке стало золотим стандартом галузі.

PVsyst — вузькоспеціалізований, але надзвичайно потужний швейцарський програмний пакет, розроблений командою Університету Женеви. Це еталонний інструмент для інженерів, які проєктують сонячні електростанції. PVsyst супроводжує проєкт від етапу попередньої оцінки інсоляції до створення детального 3D-макета станції з урахуванням складного рельєфу. Головна перевага програми — найточніший у світі алгоритм розрахунку втрат. Пакет детально моделює втрати від ближнього та дальнього затінення (навіть від проводів чи парапетів), температурну деградацію кристалів, втрати на омичний опір кабелів та ефективність MPPT-трекерів інвертора. Програма містить колосальну базу даних метеорологічних сервісів (Meteonorm, NASA) та постійно оновлювану бібліотеку компонентів від усіх світових виробників. Розповсюджується за платною ліцензією із закритим вихідним кодом [2].

System Advisor Model (SAM) — ще одна видатна розробка американської лабораторії NREL. На відміну від PVsyst, це мульти-технологічна платформа,

яка підтримує моделювання не лише класичної фотовольтаїки, а й сонячних концентраторів (CSP), вітрових парків, геотермальних станцій та установок на біомасі. SAM геніально поєднує високий рівень інженерної деталізації з інструментарієм інвестиційного банкіра. Програма здатна розрахувати складні податкові пільги, різні структури залучення кредитного капіталу, амортизаційні відрахування та метрики LCOE і NPV. Користувацький інтерфейс реалізовано у форматі покрокового майстра, а для складних серійних розрахунків передбачено вбудовану макромову (LK script). Величезним плюсом є те, що SAM — це повністю безкоштовний продукт, а його математичне ядро (SSC) має відкритий вихідний код, що робить його улюбленцем науковців [18].

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) — це класика динамічного моделювання термодинамічних та енергетичних систем, створена в Університеті Вісконсін-Медісон. Архітектура програми побудована за модульним принципом: користувач має доступ до багатой бібліотеки «Типів» (математичних моделей окремих вузлів — від теплового насоса чи сонячного колектора до багатоповерхової будівлі), які з'єднуються на графічному полотні лініями зв'язку. TRNSYS ідеально підходить для симуляції швидкоплинних перехідних процесів із кроком у частки секунди. Це робить його незамінним для розробки нестандартних гібридних установок, де електричні процеси тісно переплітаються з тепловими (наприклад, сонячні станції з тепловими акумуляторами). Програма є комерційною, проте її відкрита архітектура дозволяє користувачам інтегрувати власні математичні модулі, написані на C++ або Fortran [4].

MATLAB/Simulink — фундаментальне середовище від компанії MathWorks, без якого неможливо уявити сучасну науку. Хоча це не спеціалізований «енергетичний» софт, його набір інструментів Simscape Electrical (раніше SimPowerSystems) дозволяє збирати електричні схеми будь-якої складності на рівні окремих транзисторів, котушок та мікроконтролерів. Інженери використовують Simulink для створення інноваційних алгоритмів керування інверторами, дослідження субсинхронних резонансів та побудови цифрових двійників обладнання. Це середовище є ідеальним полігоном для тестування систем автоматики ВДЕ перед їх апаратною реалізацією. ПЗ має

високу вартість ліцензій, проте масово використовується в університетах [5].

OpenDSS (Open Distribution System Simulator) — спеціалізований симулятор, створений Інститутом досліджень електроенергетики США (EPRI) для аналізу розподільних мереж. В епоху масового встановлення дахових сонячних електростанцій виникла потреба в інструменті, який би міг швидко прорахувати тисячі вузлів мережі середньої та низької напруги. OpenDSS чудово справляється з квазістаціонарним моделюванням (QSTS) часових рядів, аналізуючи несиметрію фаз, профілі напруг на довгих фідерах та рівень вищих гармонік від сотень маленьких інверторів. Програма не має звичного графічного інтерфейсу для малювання схем; управління відбувається через текстові скрипти або COM-інтерфейс (часто керується з Python). Будучи проєктом з відкритим вихідним кодом, OpenDSS є абсолютно безкоштовним і вкрай популярним серед розробників концепцій Smart Grid [9].

PSS/E (Power System Simulator for Engineering) від Siemens PTI — це важка артилерія в електроенергетиці. Цей програмний монстр є корпоративним стандартом для диспетчерських центрів та системних операторів (ОСП) у понад 140 країнах світу. Його парафія — магістральні високовольтні мережі транснаціонального масштабу. PSS/E використовується для розрахунку поточкорозподілу, перевірки мережі на відповідність критерію надійності N-1 (відключення найбільшого елемента) та аналізу кутової і динамічної стійкості генераторів. Коли проєктується гігантський офшорний вітропарк на сотні мегават, саме в PSS/E проводиться моделювання його впливу на загальну стійкість об'єднаної енергосистеми під час коротких замикань. Інтерфейс програми консервативний, активно підтримується написання макросів на Python. Продукт має надзвичайно високу комерційну вартість [10].

DIgSILENT PowerFactory — німецький програмний комплекс преміум-класу, який об'єднує в єдиному середовищі інструменти для моделювання мереж генерації, передачі, розподілу та індустріальних об'єктів. Відмінною рисою PowerFactory є те, що в одній базі даних можна проводити і класичний розрахунок стаціонарних режимів, і аналіз електромагнітних перехідних процесів (EMT), і налаштування складної мікропроцесорної релейної

автоматики. Програма містить верифіковані моделі контролерів сучасних вітротурбін типу DFIG та сонячних інверторів, що робить її ідеальною для проходження процедур комплаєнсу (перевірки на відповідність кодексу мережі) перед введенням ВДЕ-об'єктів в експлуатацію. Це закрите комерційне ПЗ, яке широко використовується провідними інжиніринговими корпораціями [19].

Hybrid2 — історично значущий інструмент для ймовірнісного симулювання гібридних систем, створений Університетом Массачусетсу. На відміну від оптимізаторів типу HOMER, Hybrid2 є програмою прямого розрахунку: інженер жорстко задає конфігурацію мікромережі, а алгоритм докладно симулює її життя крок за кроком, фіксуючи рівень надійності електропостачання та знос батарей. Хоча сьогодні цей софт безнадійно застарів, не оновлюється і працює лише на старих версіях Windows, його математичні методи лягли в основу створення багатьох сучасних платформ [8].

RETScreen — унікальний канадський продукт від Natural Resources Canada. Це платформа на базі макросів Excel, створена для експрес-аудиту енергетичних та екологічних проєктів. Вона дозволяє інвестору за лічені хвилини, ввівши лише базові параметри об'єкта та його локацію, отримати оцінку річного виробітку ВДЕ, обсяг скорочення викидів CO₂ та розгорнуту фінансову модель з усіма ключовими метриками. RETScreen незамінний на стадії "пре-скринінгу", коли потрібно відсіяти нерентабельні ідеї. Базова версія є безкоштовною, тоді як розширений функціонал (RETScreen Expert) вимагає платної підписки [18].

Звичайно, ринок пропонує ще десятки спеціалізованих утиліт: PV*SOL для дахової фотовольтаїки, WindPro для аеродинамічного компонування вітропарків, DER-VET для розрахунку ефективності систем накопичення. Однак розглянута вище десятка формує основу сучасного світового інжинірингу.

Узагальнену інформацію щодо ключових характеристик та сфер застосування флагманських програмних продуктів структуровано у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз функціональних можливостей програмних комплексів
для симуляції систем ВДЕ

Назва програмного комплексу	Головне призначення та базовий функціонал	Підтримувані енергетичні технології	Тип користувацького інтерфейсу	Тип ліцензії	Статус відкритості вихідного коду
HOMER Pro	Структурна оптимізація гібридних мікромереж, техніко-економічне моделювання. Автоматичний перебір конфігурацій для мінімізації вартості енергії.	Фотовольтаїка, вітрогенератори, акумуляторні масиви, ДВЗ-генератори, малі ГЕС, паливні комірки.	Графічний (GUI); модульно-схемотехнічне компонування, табличний ввід.	Комерційна; наявна базова ознайомча версія.	Закритий (комерційна таємниця).
PVsyst	Професійне проектування сонячних електростанцій. Прецизійний розрахунок ККД, аналіз тіней, підбір стрингів інверторів. Містить глобальні кліматичні бази.	Виключно сонячні технології: мережеві та автономні PV-системи, насосні установки на постійному струмі.	Графічний; інструменти 3D-макетування об'єктів для розрахунку затінь.	Комерційна; обмежений функціонал у тріал-версії.	Закритий.
SAM (NREL)	Детальна оцінка генерації та глибокий фінансовий інжиніринг. Розрахунок погодинного енергобалансу спільно з калькуляцією LCOE, NPV та податкових пільг.	PV-системи (з трекерами), CSP, вітропарки, геотермія, біомаса, акумуляторні та теплові сховища (TES).	Графічний майстер налаштувань; генератор звітів; макромова LK для пакетних розрахунків.	Freeware (повністю безкоштовно).	Частково відкритий (математичне ядро SSC).
TRNSYS	Глибоке динамічне (транзієнтне) моделювання енергетичних і термодинамічних систем. Ідеально	Широкий набір: геліоколектори, PV, ВЕУ, паливні елементи, чиллери, теплові помпи,	Графічний редактор Studio плюс текстові файли конфігурації.	Комерційна; існують спеціальні академічні ліцензії.	Базовий код закритий, але підтримується додавання користувацьких C++/Fortran модулів.

	для симуляції швидкоплинних процесів та теплових балансів.	архітектурні моделі будівель.			
MATLAB / Simulink	Універсальне середовище для розробки складних математичних алгоритмів. Використовується для створення систем автоматичного керування інверторами та аналізу стійкості.	Універсальна підтримка через спеціалізовані бібліотеки (Simscape Electrical): моделюється будь-яке обладнання на фізичному рівні.	Графічне середовище структурних схем Simulink у поєднанні з класичним програмуванням MATLAB.	Комерційна (високий ціновий сегмент); популярна в академічному середовищі.	Закритий.
OpenDSS	Симуляція розподільних електромереж. Спеціалізується на оцінці впливу масового підключення розподіленої генерації на якість струму та втрати у мережі (Smart Grid аналіз).	Фокус на об'єктах DER: PV-інвертори, вітряки, системи зберігання моделюються як активні вузли мережі.	Текстовий скриптовий інтерфейс з можливістю керування через COM-порти (Python/C#); базова візуалізація.	Відкрите ПЗ (Open-source від EPRI).	Відкритий (репозиторії на GitHub/SourceForge).
PSS/E (Siemens)	Промисловий стандарт для аналізу магістральних високовольтних мереж. Розрахунки стаціонарних та перехідних процесів, аварійних режимів, стійкості систем.	Великі турбогенератори, ЛЕП. Бібліотеки типових динамічних моделей для великих вітрових і сонячних парків.	Консервативний десктопний GUI; потужна інтеграція з Python для створення макросів автоматизації.	Корпоративна на комерційна ліцензія (висока вартість).	Закритий.
DIgSILENT PowerFactory	Універсальний аналітичний комплекс для електричних мереж усіх класів напруги. Аналіз струмів КЗ, релейного захисту, ЕМТ-транзієнтів та	Охоплює все: від синхронних машин до специфічних перетворювачів сучасних ВЕУ та акумуляторних комплексів.	Сучасний GUI з гнучкими однолінійними схемами; підтримка автоматизації через DPL та Python.	Комерційна; гнучка політика ліцензування для підприємств та ВНЗ.	Закритий.

	інтеграції масивів ВДЕ.				
Hybrid2 (UMass)	Детерміновано-ймовірнісна імітація автономних енерговідбудов. Калькулює баланси генерації/споживання, витрату дизеля та термін служби батарей.	Класичний набір мікромереж: PV, БЕУ, дизель-генераторні установки, системи накопичення, випрямлячі.	Застарілий віконний GUI (Windows XP); містить вбудовані каталоги обладнання.	Freeware (архівне ПЗ).	Закритий (проект більше не підтримується розробником).
RETScreen (NRCan)	Платформа для миттєвого попереднього аналізу технічної та економічної доцільності екологічних проєктів. Бенчмаркінг та розрахунок емісії CO ₂ .	PV, вітер, біоенергетика, когенерація, заходи з утеплення та енергоефективності.	Інтерфейс на базі Microsoft Excel з інтегрованими майстрами та базами даних; автоматична генерація звітів.	Умовно безкоштовна (безкоштовний режим перегляду, повний доступ — за підпискою Expert).	Закритий.

Як яскраво демонструє наведений аналіз, архітектура та функціональне наповнення розроблялися з огляду на абсолютно різні пріоритети. Деякі рішення (HOMER, RETScreen) свідомо жертвують глибокою електротехнічною деталізацією заради забезпечення блискавичного економічного аналізу та автоматичного підбору розмірностей обладнання. На противагу їм, флагмани енергетичного моделювання (PowerFactory, PSS/E) дозволяють розгледіти форму синусоїди струму при короткому замиканні, проте вони не здатні самотійно підказати інвестору, скільки саме сонячних панелей потрібно закупити для максимальної рентабельності. Проміжну ланку золотої середини займають інструменти класу SAM та PVsyst: вони видають надійний енергетичний прогноз і підкріплюють його добротною фінансовою математикою, залишаючи, втім, остаточний підбір конфігурації за інженером [8].

Суттєвим бар'єром для користувачів є формат взаємодії з програмою. Якщо GUI-орієнтовані пакети (PVsyst, RETScreen) можна освоїти за кілька днів завдяки інтуїтивно зрозумілим вікнам і кнопкам, то потужні дослідницькі комплекси типу OpenDSS чи Simulink вимагають від фахівця ґрунтовної

підготовки у програмуванні та знання вищої математики. Однак саме ця складність винагороджується абсолютною свободою: дослідник може прописати власну логіку поведінки інвертора, що неможливо зробити у закритих комерційних продуктах.

Важливою метрикою є універсальність софту. Вузькогалузеві платформи є неперевершеними у своїй ніші. Так, моделі затінення фотоелементів у PVsyst є еталонними, але програма безсила, якщо до проєкту потрібно додати вітрогенератор. Натомість мульти-технологічні комплекси (SAM, HOMER) з легкістю комбінують різні джерела енергії, проте математичні моделі кожного окремого джерела там можуть бути дещо спрощеними [1].

Критерій відкритості вихідного коду відіграє вирішальну роль у наукових колах. Дослідники та аспіранти надають перевагу платформам рівня OpenDSS або відкритим бібліотекам Python, оскільки це дає змогу досконально розібратися в алгоритмах, верифікувати математику експериментальними даними і не залежати від дорогих підписок. Водночас системні оператори (Укренерго, ENTSO-E) вимагають використання виключно сертифікованого комерційного ПЗ (PSS/E, PowerFactory), оскільки це питання національної енергетичної безпеки та юридичної відповідальності розробників ПЗ.

Резюмуючи, можна констатувати відсутність єдиної «універсальної кнопки» для проєктування ВДЕ [12]. Алгоритм вибору інструментарію жорстко прив'язаний до масштабів завдання.

Для проєктування домашніх та малих комерційних установок (СЕС на даху підприємства) життєвий цикл проєкту розпочинається з експрес-оцінки в RETScreen. Далі для формування робочої документації та специфікації сонячного поля застосовують PVsyst. Якщо ж фермер або власник бази відпочинку бажає створити гібридну автономну систему з дизель-генератором та літєвими акумуляторами, безальтернативним помічником стане HOMER Pro, який убезпечить замовника від купівлі зайвих кіловат-годин батарей.

Коли йдеться про проєктування індустріальних об'єктів (наземних сонячних електростанцій на десятки мегават або великих вітропарків), робота розпочинається з SAM для формування солідного інвестиційного меморандуму.

Детальне проєктування сонячного масиву знову ж таки переходить до PVsyst (або ж WindPro для вітряків). Але ключовою вимогою для великих об'єктів є технічні умови на приєднання до мереж. Щоб їх виконати і довести, що нова електростанція не призведе до колапсу енергосистеми регіону, інженерна група зобов'язана виконати розрахунки динамічної стійкості у середовищі PowerFactory або PSS/E [5].

У сфері створення складних мікромереж (мікрогрідів) для критичної інфраструктури (лікарень, військових баз) зазвичай використовується тандем програм. Спочатку HOMER Pro формує архітектуру (яких генераторів і скільки потрібно), після чого ця архітектура переноситься як математична модель у Simulink або PowerFactory. Там інженери-електрики місяцями відшліфовують алгоритми мікропроцесорних контролерів, перевіряючи, чи не «просяде» напруга під час запуску потужного двигуна в ізольованому режимі [6].

Нарешті, на вістрі наукової думки (університетські лабораторії, R&D центри) домінують гнучкі та програмовані середовища. TRNSYS незамінний для симбіозу теплової та електричної генерації. OpenDSS слугує полігоном для тестування Smart Grid алгоритмів, часто у режимі ко-симуляції з іншим ПЗ. А для фінального випробування прошивок сучасних інтелектуальних інверторів застосовуються не просто програми, а апаратно-програмні комплекси реального часу (Hardware-in-the-Loop, наприклад OPAL-RT), моделі для яких розробляються у тому ж таки MATLAB/Simulink [8].

Таким чином, кваліфікований енергетик сучасності повинен бути мультиінструменталістом, володіючи як мінімум одним інструментом з кожного класу (економічним оптимізатором, спеціалізованим генераційним симулятором та платформою для розрахунку електричних режимів). Лише синергія різних програмних засобів дозволяє перетворити концептуальну ідею на надійний та прибутковий об'єкт відновлюваної енергетики.

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу сучасного стану відновлюваної енергетики, теоретичних основ побудови гібридних систем та існуючих методів їх

моделювання можна зробити низку узагальнюючих висновків. Передусім, розвиток децентралізованої екологічної генерації, зокрема сонячної фотовольтаїки, відіграє стратегічну роль та є критично важливим інструментом для забезпечення енергетичної автономності та декарбонізації економіки. Для України це питання набуло особливої гостроти через необхідність масштабного відновлення вітчизняної енергосистеми та підвищення її стійкості після систематичних руйнувань традиційної генеруючої інфраструктури.

Водночас ефективне використання таких ресурсів вимагає впровадження гібридних енергетичних систем. Об'єднання різних джерел генерації, наприклад, сонячних панелей та паливних генераторів, спільно із системами накопичення енергії дає змогу суттєво підвищити надійність електропостачання та оптимізувати використання первинних ресурсів. Варто зазначити, що безперебійна та максимально гнучка робота подібних багатокomпонентних комплексів неможлива без обов'язкового застосування інтелектуальних систем енергоменеджменту та передової силової електроніки.

Проектування та розрахунків режимів роботи ВДЕ-комплексів об'єктивно потребує аналізу складних нелінійних та стохастичних процесів, що зумовлює необхідність застосування сучасних чисельних методів. Для вирішення цих завдань найдоцільніше використовувати метод скінченних елементів для теплових задач, метод Монте-Карло для адекватної оцінки ризиків та невизначеностей, еволюційні алгоритми для оптимізації структури обладнання, а також методи машинного навчання для високоточного прогнозування генерації. При цьому найбільш перспективним напрямом на сьогодні визнано застосування синергетичних гібридних математичних моделей, що поєднують кілька обчислювальних підходів.

Детальний аналіз специфіки сучасного програмного забезпечення (таких комплексів, як HOMER Pro, PVsyst, SAM, MATLAB/Simulink тощо) продемонстрував, що на ринку не існує єдиного універсального інструменту. Жодна з існуючих платформ не здатна однаково ефективно та одночасно вирішувати завдання глибокої економічної оптимізації, максимально точного розрахунку генерації та комплексного аналізу динамічної стійкості мережі.

З огляду на вищезазначене, для успішного проєктування та оптимізації сонячних фотоелектричних установок необхідно використовувати комплексний підхід, що органічно поєднує різні інструменти симуляції. Це повною мірою підтверджує наукову та практичну актуальність розроблення спеціалізованого автоматизованого комплексу імітаційного моделювання, який буде здатний інтегрувати завдання розрахунку енергетичних режимів та оптимізації ключових техніко-економічних показників у межах єдиного обчислювального середовища.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА АРХІТЕКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1. Фізичні основи фотогальванічного перетворення

Базовим принципом роботи сонячних елементів є фотогальванічний ефект, сутність якого полягає у генерації електрорушійної сили всередині напівпровідникової структури під час поглинання квантів світла (фотонів). Для того щоб цей процес відбувся, енергія падаючого фотона повинна бути більшою за ширину забороненої зони матеріалу. Якщо розглядати класичний кристалічний кремній, ширина забороненої зони якого становить близько 1,12 eV за стандартної температури 25 °C, то генерація електронно-діркових пар відбувається під дією фотонів сонячного випромінювання переважно у спектральному діапазоні від 300 до 1100 нм. Надалі вбудоване електростатичне поле р-п-переходу здійснює просторове розділення цих нерівноважних носіїв заряду. Це призводить до виникнення фотоструму, який під час підключення зовнішнього електричного навантаження трансформується у корисну електричну потужність. Стандартна архітектура кремнієвої фотоелектричної комірки включає базовий слаболегований р-шар та ультратонкий фронтальний п-емітер. З метою мінімізації відбиття світла на фронтальну поверхню наноситься спеціальне антивідбивне покриття (найчастіше на основі нітриду кремнію $\text{SiN}_x\text{:H}$), завдяки якому оптичні втрати вдається знизити до рівня 3–4 %. Для збору згенерованого струму використовується система металізації у вигляді струмозбірних шин та тонких контактних смуг (пальців), просторова конфігурація яких оптимізована для досягнення компромісу між мінімальним послідовним опором та найменшою площею оптичного затінення поверхні. Щоб сформувати повноцінний сонячний модуль, окремі комірки комутуються послідовно та інкапсуються за допомогою плівки з етиленвінілацетату (EVA). З лицьового боку конструкція захищається шаром спеціального загартованого скла, а зі зворотного — міцним полімерним листом (бекшитом). Створена таким чином багатошарова композитна структура гарантує високу механічну стійкість,

надійну ізоляцію від атмосферної вологи та багаторічну стабільність ключових електричних характеристик пристрою [12].

Відповідно до фундаментального закону збереження енергії, загальний потік сонячної радіації G_t (вимірюється у $\text{Вт}/\text{м}^2$), який падає на фронтальну площину фотоелектричного модуля із загальною робочою площею A , зазнає ряду фізичних трансформацій. Цей енергетичний баланс можна описати наступним математичним рівнянням (2.1):

$$G_t \cdot A = P_{el} + P_{th} + P_{opt}$$

У наведеній формулі складова P_{th} характеризує теплові втрати. Вони виникають переважно внаслідок безвипромінювальної рекомбінації носіїв заряду та джоулевого виділення тепла під час проходження струму через внутрішній опір комірок. Ці процеси неминуче призводять до нагрівання фотомодуля, робоча температура якого під час експлуатації значно перевищує температуру навколишнього середовища. Охолодження конструкції відбувається природним шляхом завдяки конвективному обдуванню повітрям та радіаційному випромінюванню тепла у простір. Інша складова енергетичного балансу, P_{opt} , описує сукупні оптичні втрати. До цієї категорії належать процеси прямого відбиття світлових променів від поверхні модуля, спектральна невідповідність (коли енергія фотонів є недостатньою або надлишковою для генерації пар носіїв), а також наскрізне пропускання довгохвильового випромінювання крізь активний напівпровідниковий шар без поглинання. З огляду на це, можна стверджувати, що фактична експлуатаційна ефективність фотоелектричної установки залежить не виключно від фізико-хімічних властивостей напівпровідника, але й значною мірою диктується зовнішніми метеорологічними умовами та конструктивними особливостями самого модуля, оскільки кожен із цих факторів безпосередньо впливає на складові загального енергетичного балансу [9].

Серед усього спектра зовнішніх факторів найсильніший негативний вплив на рівень генерації має температурний режим. Підвищення температури напівпровідника супроводжується падінням напруги холостого ходу, що кількісно описується лінійним температурним коефіцієнтом потужності (для

стандартних кремнієвих модулів він становить приблизно $-0,45\%^\circ\text{C}$). Як наслідок, у спекотну літню погоду пікова вихідна потужність станції суттєво знижується. Ще однією критичною проблемою є нерівномірне (локальне або лінійне) затінення поверхні панелей. Воно кардинально змінює розподіл опорів у послідовному ланцюзі комірок, спричиняючи локальний перегрів (ефект «гарячої плями» або hot-spot), що може призвести до незворотного руйнування матеріалу. Ефективним технічним рішенням для запобігання цій проблемі є обов'язкова інтеграція паралельних шунтувальних (байпасних) діодів. Крім того, на продуктивність впливає стан фронтальної поверхні: накопичення пилу, бруду чи органічних залишків відчутно погіршує оптичну прозорість захисного скла. Наприклад, наявність поверхневого забруднення зі щільністю близько 5 г/м^2 здатна знизити коефіцієнт світлопропускання на 3–4 %. Важливу роль відіграє також просторова орієнтація модуля. Геометричний кут падіння сонячних променів відносно нормалі до площини панелі визначає ефективність інсоляції, що математично виражається через косинусоїдальну залежність ($f\theta = \cos\theta$). Так, збільшення кута відхилення до 30° призводить до втрати близько 13 % доступної сонячної енергії. Окремої уваги заслуговують незворотні деградаційні процеси у кристалічній структурі, які прийнято класифікувати на кілька типів. До них належить початкова світлова деградація (LID), яка проявляється у перші 100 годин опромінення і може сягати 2 % втрат потужності, а також довгострокова деградація, індукована потенціалом (PID), що становить до 0,7 % на рік і активно розвивається за умов підвищеної вологості повітря та наявності негативного потенціалу на металевій рамі модуля. Загалом, сукупний річний темп деградації потужності сучасних комерційних кремнієвих фотоелектричних панелей оцінюється на рівні 0,5–0,8 %. Цей експлуатаційний спад є критично важливим параметром, який необхідно обов'язково закладати у математичні моделі під час довгострокового прогнозування обсягів генерації електроенергії протягом усього розрахункового життєвого циклу сонячної електростанції.

2.2. Кліматичні та астрономічні передумови розрахунку інсоляції

Достовірне та точне прогнозування енергетичного виробітку будь-якої

фотоелектричної станції фундаментально спирається на правильний розрахунок інсоляції — сумарного потоку сонячної енергії, який фактично потрапляє на активну робочу поверхню фотомодулів. З математичної точки зору, інтеграл густини енергетичного потоку G_t протягом доби або цілого року визначається комплексною взаємодією двох основних груп факторів. Перша група — це астрономічні чинники, які встановлюють строгу геометричну картину освітлення земної поверхні залежно від часу та координат. Друга група — кліматичні та метеорологічні умови, які виконують роль своєрідного фільтра, суттєво модифікуючи інтенсивність та спектральний склад випромінювання під час його проходження крізь товщу земної атмосфери [10].

У межах астрономічного аспекту базисними змінними виступають географічна широта розташування об'єкта φ , поточна сонячна деклінація (схилання) δ , годинний кут ω та специфічне рівняння часу E_t . Деклінація, яка відображає кут нахилу земної осі відносно площини екліптики, підпорядковується гармонійному закону зміни в межах від $-23,45^\circ$ до $+23,45^\circ$ протягом року. Для її аналітичного обчислення в інженерній практиці найчастіше використовується класична емпірична формула Спенсера, де аргументом виступає порядковий номер дня у році n :

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

Спільна комбінація географічної широти φ , деклінації δ та годинного кута ω дає змогу однозначно визначити миттєвий сонячний зенітний кут θ_z за допомогою фундаментального тригонометричного рівняння:

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

На основі отриманого значення зенітного кута розраховуються ключові просторові координати світила: висота Сонця над лінією горизонту $\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$ та сонячний азимут γ_s . Саме ці параметри безпосередньо формують кут падіння прямих променів на площину фотоелектричного модуля θ і визначають так званий косинус-фактор $f_\theta = \cos\theta$, що характеризує ефективну площу збору енергії. Крім сезонних змін, добова траєкторія Сонця підлягає обов'язковому

коригуванню за допомогою рівняння часу E_t , яке компенсує еліптичність земної орбіти та нерівномірну швидкість руху планети по ній. Амплітуда коливань цієї поправки досягає ± 14 хвилин, що є критично важливим фактором при побудові високоточних моделей. Навіть при розрахунках із хвилинним кроком дискретизації ігнорування рівняння часу призводить до значного та неприпустимого зсуву розрахункових піків інсоляції відносно реального астрономічного полудня [14].

Зі свого боку, кліматичні властивості атмосфери накладають глибокі спектральні та амплітудні зміни на первинну астрономічну компоненту. Фундаментальний фізичний механізм експоненційного послаблення інтенсивності прямого сонячного випромінювання під час його проходження через газове та аерозольне середовище найточніше описується класичним законом Бугера-Ламберта-Бера:

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

Для комплексної оцінки сумарної (глобальної) радіації у кліматології та енергетиці вводиться спеціальний безрозмірний критерій — індекс прозорості атмосфери k_t , який розраховується як відношення фактичної глобальної радіації до максимально можливої позаатмосферної:

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

Багаторічні статистичні масиви розподілу цього індексу є основою для формування типового метеорологічного року (ТМУ — Typical Meteorological Year) — спеціалізованого набору репрезентативних даних про погодні умови конкретної локації. Зокрема, для кліматичної зони середніх широт України багаторічний середній показник k_t коливається в діапазоні 0,46–0,53, причому в зимові місяці він сягає свого мінімуму через підвищену щільність хмарного покриву та більшу товщину повітряної маси. Саме хмарність відіграє вирішальну роль у перерозподілі енергії між прямою та розсіяною (дифузною) складовими радіації. Для математичного розрахунку частки дифузного світла найчастіше застосовують емпіричні моделі Ербса або Клюха-Делькова, які спираються на поточне значення індексу k_t . Водночас для точного обчислення спектрального складу випромінювання до моделі додатково вводяться такі

параметри, як кількість осадженої водяної пари, показник аерозольної оптичної товщини (AOD) та добова динаміка альbedo підстилаючої поверхні. У сучасних інженерних розрахунках ці величини екстрагуються з даних локальних метеорологічних станцій, глобальних супутникових баз (наприклад, NASA POWER чи Copernicus) або з масивів високочастотного кліматичного реаналізу ERA5. У підсумку, фінальний прогноз інсоляції формується шляхом числового інтегрування миттєвих значень густини потоку (G_t , θ_z , k_t) на обраному часовому інтервалі. Цей розрахунок обов'язково коригується з огляду на просторовий орієнтаційний коефіцієнт панелей, втрати на відбиття, ефекти поверхневого забруднення та поступову деградацію оптичних властивостей системи. Таким чином, астрономічна геометрія встановлює абсолютну верхню межу доступного енергетичного потенціалу, тоді як локальний кліматичний стан атмосфери трансформує цю межу до фактичного експлуатаційного рівня, який і стає базою для подальшої технічної оптимізації фотовольтаїчної установки.

2.3. Математичні моделі системи

Обчислювальне ядро програмного комплексу «solar_model» базується на глибокій інтеграції кількох взаємопов'язаних математичних підмоделей. Кожна з цих складових детально формалізує окремі фізичні процеси, що протікають у фотоелектричному перетворювачі, завдяки чому досягається високоточне відтворення загальної динаміки генерації струму в умовах мінливого навколишнього середовища. Фундаментом цієї архітектури виступає електрична модель, побудована на базі класичної параметризованої еквівалентної однодіодної схеми. Вона включає генератор фотоструму I_{ph} , ідеальний напівпровідниковий діод із відповідним струмом зворотного насичення I_0 , а також еквівалентні послідовний R_s та шунтувальний R_{sh} опори. Для знаходження робочої точки системи застосовується розв'язання базового нелінійного рівняння [2]:

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

Знаходження коренів цього рівняння здійснюється за допомогою ітераційного методу Ньютона-Рафсона з використанням алгоритмів адаптивного демпфування. Це дає змогу оперативно розраховувати вольт-амперні характеристики та визначати оптимальну робочу точку за будь-яких комбінацій рівня інсоляції G_t та поточної температури фотоелемента T_c . Базові значення струмів I_{ph} та I_0 попередньо нормуються відповідно до стандартних тестових умов (STC). Водночас температурна залежність цих параметрів враховується шляхом введення спеціальних лінійних коефіцієнтів α_1 та β_v , що гарантує високу точність екстраполяції електричних характеристик у всьому експлуатаційному діапазоні температур [6].

Безпосередньо з електричною частиною взаємодіє термодинамічна підмодель, яка описує теплові процеси за допомогою нестационарного диференціального рівняння теплопровідності. Для його чисельного розв'язання застосовується метод скінченних різниць, реалізований через абсолютно стійку неявну різницеву схему Кранка–Ніколсона. Оскільки фотомодуль має малу товщину, його температурне поле моделюється у двовимірному наближенні. Процеси теплообміну з довкіллям формалізуються через крайові умови третього роду: комплексний конвективно-радіаційний коефіцієнт тепловіддачі $h_c + h_r$ адаптивно враховує швидкість обдування вітром, ефективну температуру небозводу та коефіцієнт теплового випромінювання (емісивність) захисного скла. Знайдене просторове розподілення температури $T_c(x,y,t)$ математично усереднюється до єдиного скалярного показника, який передається в однодіодну електричну схему, замикаючи таким чином контур зворотного зв'язку між тепловою та генераційною підсистемами [8].

Окремим надважливим компонентом є кліматичний модуль, який функціонує як стохастичний генератор метеорологічних сценаріїв. Його алгоритм органічно поєднує добову авторегресійну модель першого порядку $AR(1)$ для розрахунку глобального індексу прозорості атмосфери k_t та синтетичний марковський процес, що імітує динаміку висотних ярусів хмарності. Розрахунок базової позаатмосферної радіації G_0 виконується за класичними алгоритмами Купера-Спенсера. Згенеровані масиви індексу k_t

розкладаються на пряму G_b та дифузну G_d складові випромінювання з використанням емпіричних залежностей Ербса. Після цього отримані потоки проєктуються на похилу площину сонячної панелі з урахуванням косинус-фактора f_θ та коригувальних коефіцієнтів альbedo підстилаючої поверхні. Запропонований стохастичний підхід усуває необхідність оперування масивними базами кліматичних даних, дозволяючи з високою достовірністю відтворювати статистичний розподіл інсоляції на будь-яких часових горизонтах — від погодинних зрізів до багаторічних циклів [10].

Верхнім рівнем ієрархії програмного комплексу виступає модуль багатокритеріальної оптимізації. Його головне завдання — мінімізація цільової функції нормованої вартості електроенергії (LCOE), яка обчислюється з огляду на щорічний коефіцієнт деградації потужності λ_{deg} та ключові фінансово-економічні показники проєкту. Процес пошуку оптимуму базується на використанні алгоритму Левенберга–Маркуардта. На кожному кроці ітерації система тонко налаштовує просторові параметри (кут нахилу β , азимут γ) та оптимальну кількість встановлених фотомодулів. Для обчислення напрямку пошуку використовуються високоточні градієнти цільової функції, отримані за допомогою методу комплексного кроку. Знайдена градієнтна інформація безперервно транслюється до електричної та теплової підмоделей для перерахунку енерговиробітку та супутніх витрат, що гарантує стійку збіжність оптимізаційного процесу всього за три-п'ять зовнішніх ітераційних циклів.

Підсумовуючи архітектуру системи, можна констатувати, що її математична композиція є складним гібридним механізмом. Вона об'єднує потужне енергетичне ядро на базі еквівалентної однодіодної схеми, транзієнтний теплопровідний підмодуль з урахуванням радіаційно-конвективного обміну, інтелектуальний стохастичний генератор кліматичних даних та високоефективний алгоритм нелінійної економічної оптимізації. Синергетична інтеграція цих блоків у єдину програмну оболонку дозволяє не лише максимально достовірно симулювати експлуатаційні режими фотоелектричних станцій, але й проводити глибокий аналіз впливу різноманітних конструктивних рішень і мінливих погодних факторів на довгострокову генерацію та загальний

енергетичний баланс об'єкта.

2.4. Чисельні методи, реалізовані у програмі

Програмний комплекс, що отримав назву «solar_model», виступає в ролі високотехнологічного інтегрованого середовища для проведення складних імітаційних розрахунків. У межах цієї платформи відбувається тісна алгоритмічна взаємодія підсистем, які мають абсолютно різну математичну та фізичну природу. Саме тому для програмної реалізації було залучено широкий арсенал чисельних методів, кожен з яких пройшов глибоку адаптацію до специфіки конкретної підзадачі з урахуванням суворих критеріїв обчислювальної стійкості, граничної точності та швидкодії. Зокрема, базовим інструментом для пошуку оптимального просторового кута нахилу фотоелектричних панелей було обрано класичний метод Ньютона (відомий також як метод дотичних). Його математична сутність полягає у послідовній локальній лінеаризації цільової функції (якою виступає загальний виробіток електроенергії) безпосередньо в околі поточної розрахункової оцінки. Спираючись на аналітичне або чисельне обчислення першої та другої похідних від інтегральної добової потужності за просторовим кутом, алгоритм здійснює ітеративне наближення до кореня диференціального рівняння $d_E / d_\theta = 0$. За умови достатньої математичної гладкості цільової функції та коректно заданого початкового наближення, цей метод гарантує високу квадратичну збіжність. Як наслідок, обчислювальна система здатна блискавично локалізувати точку глобального максимуму енерговиробітку, повністю уникаючи ресурсомісткого та надзвичайно тривалого перебору всього спектра можливих кутів розташування.

Наступним надважливим етапом є розв'язання масивних систем лінійних алгебраїчних рівнянь, які закономірно виникають після процедури просторової дискретизації об'єкта в процесі скінченно-елементного аналізу його теплової поведінки. Для виконання цього масштабного завдання імплементовано високоефективний метод матричної прогонки (відомий у світовій науковій літературі як алгоритм Томаса — Thomas algorithm). Зважаючи на те, що

глобальна матриця жорсткості для задачі одновимірної теплопровідності володіє яскраво вираженою стрічковою тридіагональною структурою, використання прямого алгоритму прогонки є найбільш раціональним рішенням. Він забезпечує лінійну обчислювальну складність порядку $O(n)$ та зводить до абсолютного мінімуму витрати оперативної пам'яті обчислювальної машини. Ця характеристика набуває критичного значення під час симулювання теплових процесів в ультратонких шарах напівпровідникового поглинального матеріалу, де для досягнення необхідної просторової роздільної здатності вимагається застосування надзвичайно густої розрахункової сітки з колосальною кількістю вузлів дискретизації.

Безпосереднє формування поля температурного розподілу по всій площі фотоелектричної панелі здійснюється із залученням потужного апарату методу скінченних елементів (МСЕ). Згідно з цим підходом, складна геометрія сонячного модуля віртуально розбивається на скінченну множину лінійних або квадратичних скінченних елементів. У межах кожного такого локального субдомену вихідне диференціальне рівняння теплопровідності математично трансформується у відповідну інтегральну (слабку) форму. Після етапу апроксимації неперервного температурного поля спеціальними базисними (формовими) функціями та процедури асемблювання глобальної матриці системи, кінцева система рівнянь успішно розв'язується вищезгаданим алгоритмом прогонки. Застосування саме такої обчислювальної стратегії дає безпрецедентну можливість максимально деталізовано візуалізувати внутрішні градієнти температури. Це, у свою чергу, дозволяє з високою точністю ідентифікувати локальні зони термічного перегріву, які безпосередньо зумовлюють падіння коефіцієнта корисної дії фотоелементів, і таким чином забезпечити феноменальну точність розрахунку миттєвої експлуатаційної ефективності установки.

Для адекватного статистичного відтворення мінливих метеорологічних умов у програмному комплексі реалізовано стохастичний метод Монте-Карло. Його алгоритмічна робота починається з глибокого статистичного аналізу масивів історичних ретроспективних даних щодо температури навколишнього

середовища, рівня сонячної інсоляції та швидкості вітру. На базі цього глибокого аналізу будуються точні емпіричні або параметричні функції розподілу ймовірностей та встановлюються крос-кореляційні зв'язки між різними кліматичними змінними. Спираючись на ці математичні конструкції, генератор псевдовипадкових чисел продукує масивні репрезентативні множини синтетичних погодних траєкторій, які максимально реалістично відображають глибоко імовірнісний та стохастичний характер справжнього клімату. Такий інноваційний підхід відкриває шлях до всебічної оцінки можливої варіативності вихідної електричної потужності станції та дозволяє науково обґрунтовано формувати довірчі інтервали для довгострокових прогнозів енерговиробітку.

Фінальний математичний перехід від дискретних значень миттєвої генерованої потужності до сумарного обсягу виробленої енергії за весь світловий день реалізується за допомогою методів чисельного інтегрування. У базовій архітектурі програми впроваджено розумний комбінований підхід. На гладких, безперервних ділянках добової кривої генерації застосовується класична високоточна формула Сімпсона (метод парабол). Натомість у складних граничних зонах — поблизу точок світанкових та сутінкових інфлексій (перегинів), де математичні похідні функції зазнають різких розривів, погіршуються або стають нестабільними, алгоритм автоматично перемикається на метод трапецій із використанням адаптивного кроку просторової дискретизації. Така гібридна інтеграційна схема гарантовано зберігає високий четвертий порядок алгебраїчної точності розрахунків, причому робить це без будь-якого експоненційного зростання обчислювальних витрат процесорного часу. Вона забезпечує абсолютно коректне та чутливе врахування впливу навіть найшвидших температурних флуктуацій на миттєву ефективність роботи сонячної панелі.

У своїй сукупності всі описані вище чисельні алгоритми утворюють єдиний, нерозривний та логічно вивірений обчислювальний контур. Метод Монте-Карло безперебійно постачає реалістичні погодні сценарії; апарат скінченних елементів на основі цих даних розраховує коректні температурні поля для визначення поточного теплового ККД; алгоритм Ньютона паралельно здійснює геометричну

оптимізацію модуля під кожен згенерований кліматичний сценарій; метод матричної прогонки забезпечує блискавичне розв'язання супутніх лінійних систем; а фінальна чисельна інтеграція акумулює миттєві показники потужності у загальний добовий або річний енергобаланс. Саме така гнучка модульна архітектура побудови програмного ядра наділяє систему унікальними можливостями: вона дозволяє легко масштабувати математичну модель, безболісно замінювати окремі обчислювальні блоки на ще більш точні чи швидкі аналоги розробки, а також безшовно інтегрувати отримані техніко-фізичні результати у подальший глибокий економічний аналіз загальної рентабельності фотоелектричного проєкту.

2.5. Архітектура програмного комплексу

Розроблений програмний комплекс є спеціалізованим інструментальним середовищем, призначеним для проведення комплексного детермінованого та стохастичного моделювання сонячних енергетичних систем. Його алгоритми глибоко враховують широкий спектр метеорологічних, кліматичних та суто технічних експлуатаційних факторів. Головним завданням цієї системи є точна чисельна симуляція фізичних процесів, що протікають у фотоелектричних установках за різноманітних умов навколишнього середовища, а також автоматизований пошук і визначення оптимальних конфігураційних параметрів, які гарантують максимізацію генерації електричної енергії.

З інженерної точки зору, система спроектована на основі парадигми багаторівневої модульної архітектури. Такий концептуальний підхід забезпечує виконання трьох фундаментальних вимог до сучасного наукового програмного забезпечення:

- **Висока інтерактивність:** наявність як інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу (GUI) для візуальної роботи, так і можливості швидкого консольного запуску для пакетної обробки даних.
- **Гнучка розширюваність (масштабованість):** архітектура дозволяє безперешкодно інтегрувати нові математичні моделі, оптимізаційні алгоритми чи додаткові типи обладнання без необхідності переписування базового ядра.

- Максимальна наочність результатів: вбудовані інструменти забезпечують автоматичну генерацію, візуалізацію та експорт графіків і звітів у зручних форматах.

Сформовані метеорологічні профілі передаються до фізико-математичних моделей. Під час розрахунку моделі активно обмінюються даними з оптимізатором для пошуку найкращих кутів нахилу. Фінальні масиви даних спрямовуються до блоку візуалізації та паралельно записуються у файл звіту. Цей кругообіг інформації відображено на схемі нижче.

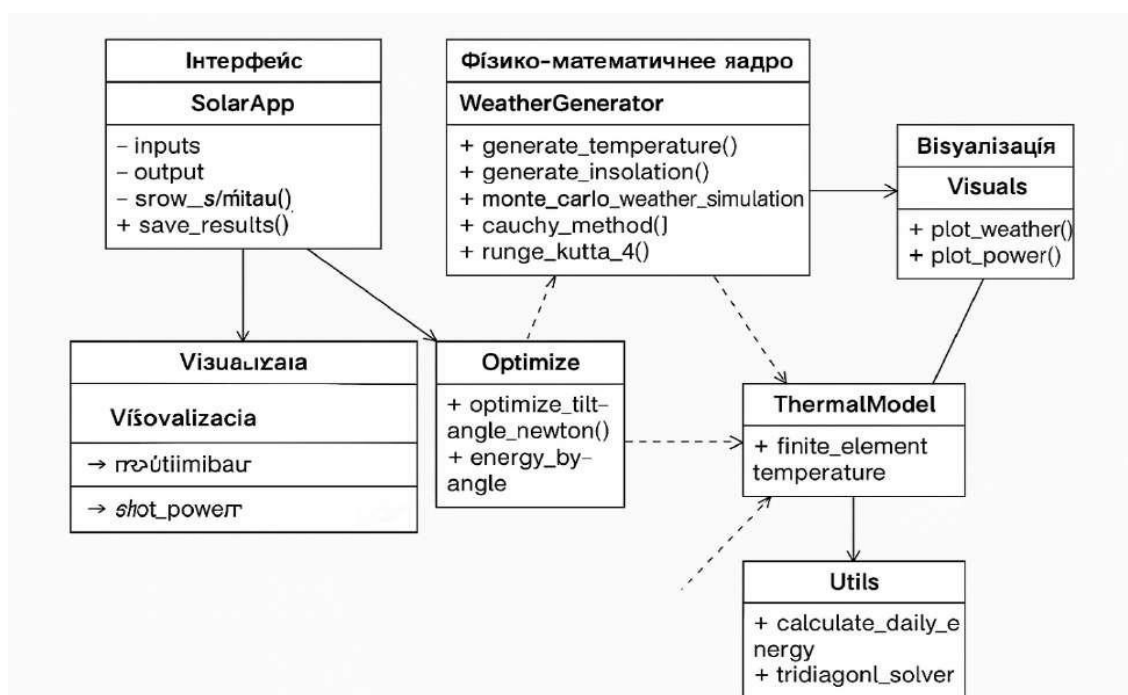


Рисунок 2.1 – UML-схема логічних зв'язків та інформаційної взаємодії між компонентами

У програмному коді домінує функціональний підхід до програмування. Об'єктно-орієнтована парадигма (класи) застосовується переважно для побудови графічної оболонки (SolarApp), тоді як обчислювальне ядро реалізовано у вигляді набору оптимізованих чистих функцій.

Графічний інтерфейс програми реалізований за допомогою стандартної бібліотеки Tkinter. Він створений для забезпечення максимальної зручності користувача і пропонує такий функціонал:

- Гнучке введення вхідних параметрів системи (вибір конкретного дня року, географічної широти, загальної площі сонячного поля, кількості встановлених модулів, початкових погодних умов, опадів, хмарності та часових рамок моделювання).
- Запуск процесу симуляції в один клік із миттєвим виведенням ключових метрик у вбудоване текстове вікно журналу.
- Інтерактивну генерацію та відображення багатих інформаційних графіків (температурних коливань, кривих інсоляції, динаміки потужності та FEM-розподілу нагріву) у спеціально відведеному візуальному блоці.
- Зручний механізм експорту отриманих розрахунків у локальний текстовий файл.

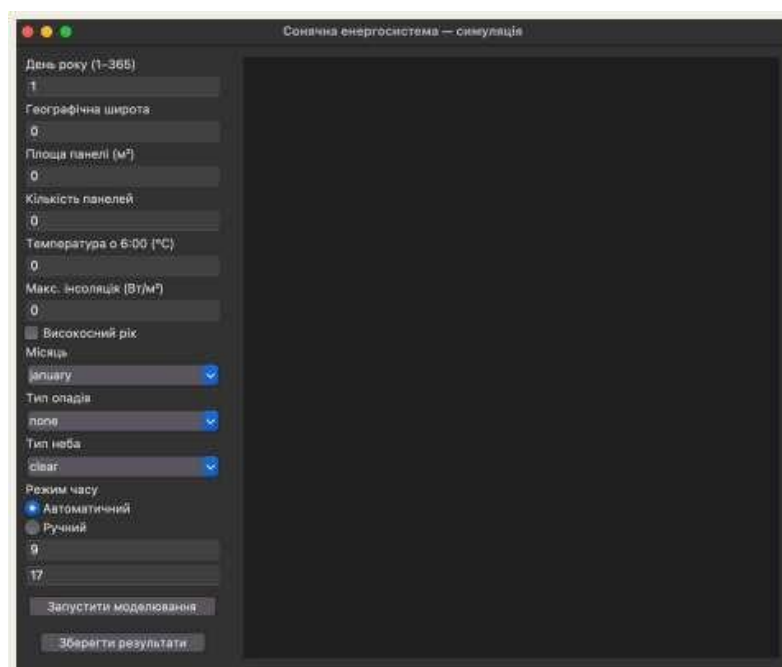


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд розробленого графічного інтерфейсу користувача

Структурно інтерфейс поділено на кілька робочих зон:

- Ліва панель введення даних: тут зосереджені всі елементи керування для налаштування симуляції. Користувач може вказати день року (від 1 до 365 або 366, якщо активовано чекбокс «Високосний рік»), задати географічну широту локації, визначити фізичні габарити установки (площа однієї панелі та загальна кількість), а також базову ранкову температуру (о 6:00 за Цельсієм) і пікове значення сонячної інсоляції у Вт/м². Додатково передбачено випадаючі меню для

вибору місяця, типу атмосферних опадів та ступеня хмарності (типу неба). Блок "Режим часу" дозволяє перемикатися між автоматичним розрахунком та ручним визначенням годин початку і завершення симуляційного циклу.

- Кнопки керування: розміщені під блоком налаштувань. Кнопка «Запустити моделювання» ініціює обчислювальний процес, запускаючи роботу всього математичного ядра. Кнопка «Зберегти результати» відповідає за запис фінальних даних у довгострокову пам'ять.

- Права зона візуалізації: це велике інтерактивне полотно, на якому після успішного завершення обчислень рендеряться результативні графіки. Тут інженер може наочно проаналізувати зміну інсоляції протягом дня або побачити, як температурний градієнт вплинув на загальний виробіток струму.

Завдяки ретельно продуманій ергономіці, інтерфейс не вимагає від користувача глибоких знань у програмуванні чи консольному адмініструванні. Усі поля мають чіткі підписи та валідацію вводу, що зводить до мінімуму ймовірність помилок. Це робить комплекс однаково зручним як для академічного середовища (студентів і науковців), так і для професійних інженерів-проектувальників у галузі відновлюваної енергетики.

Особливу увагу приділено наповненню фізико-математичного ядра.

Генератор погоди (`weather_generator`) не просто видає статичні цифри, а розраховує складний профіль освітленості, враховуючи поточний сезон, наявність хмарного покриву та тип опадів. Температурна крива будується на базі ранкового мінімуму з накладанням денного прогріву та охолоджувального ефекту від дощу чи снігу.

Електрична ефективність фотомодуля коригується залежно від температури за класичним термодинамічним законом:

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

Визначення просторового кута падіння променів спирається на точні астрономічні алгоритми, що враховують широту та сонячне схилення у конкретний день року. Сумарна електрична потужність розраховується за

формулою, що об'єднує ефективність, площу (A), рівень інсоляції (G) та косинус кута падіння (θ):

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

Для симуляції транзйєнтних процесів ядро пропонує надійні інструменти чисельного інтегрування (алгоритми Коші та метод Рунге-Кутти 4-го порядку). Підсистема оптимізації використовує алгоритм Ньютона (інтегрований через метод `minimize_scalar` бібліотеки `Sci`) для прецизійного пошуку такого кута нахилу панелі, який максимізує енергозбір. Теплова підмодель застосовує одновимірний метод скінченних елементів (1D FEM) для аналізу розподілу тепла по поверхні, розв'язуючи отриману тридіагональну матрицю класичним методом прогонки.

Важливою архітектурною особливістю є використання векторизованих обчислень на базі бібліотеки `Num`. Оперування масивами даних замість циклів дозволяє миттєво виконувати погодинне моделювання, легко змінювати крок дискретизації та запускати масові пакетні симуляції без відчутних затримок. За побудову якісної аналітичної графіки (використовується бібліотека `matplotlib`) відповідає модуль.



Рисунок 2.3 – Алгоритмічна блок-схема процесу імітаційного моделювання



Рисунок 2.4 – Діаграма потоків даних (Data Flow) усередині програмного комплексу

Така модульна, чітко інкапсульована організація коду створює потужний плацдарм для майбутнього розвитку системи. Архітектура дозволяє легко масштабувати обчислювальне ядро (наприклад, інтегрувати моделі вітрогенераторів або розширити тепловий аналіз до формату 2D), підключати парсери для імпорту реальних кліматичних баз у форматі .csv та автоматизувати проведення масштабних дослідницьких експериментів. У підсумку розроблений комплекс є повноцінним науково-інженерним інструментом, що однаково ефективно слугує цілям академічної освіти та глибокого промислового аналізу ВДЕ-об'єктів.

Висновок до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було закладено глибокий фізико-математичний та архітектурний фундамент для створення автоматизованого комплексу імітаційного моделювання сонячної фотоелектричної установки. Передусім, у ході дослідження детально проаналізовано фізичні основи фотогальванічного перетворення та формалізовано структуру енергетичного

балансу сонячного модуля. Доведено, що для високоточного прогнозування обсягів генерації електроенергії критично важливо враховувати не лише стандартні паспортні характеристики обладнання, але й складну астрономічну геометрію, зокрема зенітний кут та рівняння часу, у нерозривному поєднанні зі стохастичними кліматичними факторами, такими як індекс прозорості атмосфери, вплив хмарного покриття та температурна деградація фотоелементів.

На базі цих теоретичних передумов розроблено інтегровану комплексну математичну модель системи. Вона органічно об'єднує електричну підсистему, побудовану на основі параметризованої еквівалентної однодіодної схеми, транз'єнтну термодинамічну підмодель для розрахунку конвективно-радіаційного теплообміну, стохастичний генератор метеорологічних сценаріїв та спеціалізований модуль багатокритеріальної економічної оптимізації, спрямований на мінімізацію нормованої вартості електроенергії (LCOE). Такий міждисциплінарний гібридний підхід гарантує максимально адекватне відтворення реальних експлуатаційних режимів установки. Водночас для забезпечення стабільності, високої точності та швидкодії розрахунків до обчислювального ядра було успішно інтегровано низку передових чисельних алгоритмів. Серед них виділяється метод Ньютона, застосований для просторової оптимізації кута нахилу панелей, одновимірний метод скінченних елементів (1D FEM) у зв'язці з матричною прогонкою для аналізу температурних градієнтів, метод Монте-Карло для генерації ймовірнісних погодних траєкторій, а також адаптивні схеми чисельного інтегрування, що відповідають за конвертацію миттєвої потужності у загальний добовий виробіток.

У підсумку, сформована науково-методична база та розроблена програмна архітектура утворюють надійний, обґрунтований інструментарій. Він є повністю готовим до проведення масштабних імітаційних експериментів, верифікації побудованих моделей та пошуку оптимальних техніко-економічних рішень, що становить основу подальших досліджень у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Підготовка середовища розробки

Фундаментальною передумовою для успішної реалізації та забезпечення абсолютної відтворюваності обчислювальних експериментів є грамотне налаштування програмно-апаратного середовища. Робочу інфраструктуру програмного комплексу «solar_model» розгорнуто на базі стабільної 64-розрядної операційної системи Ubuntu 22.04 LTS. Вибір цього дистрибутиву Linux обґрунтований його високою надійністю, безпекою та наявністю вичерпного репозиторію спеціалізованих наукових бібліотек. Базовою платформою для написання коду обрано мову програмування Python версії 3.11, яка відзначається високою продуктивністю та розширеною підтримкою типізації. Математичне ядро комплексу спирається на потужні високорівневі пакети та Matplotlib. Для подолання проблеми низької швидкодії інтерпретованої мови під час виконання інтенсивних ітераційних циклів методу Монте-Карло застосовано JIT-компілятор (Just-In-Time) Numba, що дозволяє транслювати критичні ділянки коду безпосередньо у машинні інструкції. З метою уникнення конфліктів між різними версіями бібліотек протягом усього життєвого циклу проєкту створено ізольоване віртуальне середовище (venv), де всі залежності суворо зафіксовані у конфігураційному файлі.

Управління версіями вихідного коду здійснюється за допомогою системи контролю версій Git із розміщенням репозиторію на хмарній платформі GitHub. Це створює ідеальні умови для проведення перехресного інспектування коду (pull request review) та налаштування конвеєрів безперервної інтеграції (CI). Завдяки інструментарію GitHub Actions кожен новий фрагмент коду автоматично проходить статичний аналіз за допомогою лінтерів Ruff та перевірку типів через Муру. Окрім цього, автоматично запускається набір модульних тестів у середовищі Pytest та здійснюється збірка Docker-образу. Контейнеризація на базі офіційного мінімалістичного образу python:3.11-slim, доповненого системними оптимізованими бібліотеками лінійної алгебри

BLAS/LAPACK, гарантує ідентичність виконання програми на будь-яких обчислювальних вузлах. Серверна частина апаратного забезпечення вимагає використання сучасного процесора з підтримкою векторних інструкцій AVX2, наявності щонайменше 16 ГБ оперативної пам'яті та високошвидкісного твердотілого накопичувача (SSD) для миттєвого доступу до масивів кліматичних даних.

Система зберігання даних спроектована з урахуванням сучасних стандартів архітектури програмного забезпечення. Для запису структурованих результатів симуляції та проміжних метрик використовується надійна реляційна база даних PostgreSQL 15, взаємодія з якою відбувається через оптимізований драйвер psycopg2. Великі масиви неструктурованих даних, зокрема кліматичні сценарії у форматі Raw NetCDF, зберігаються в S3-сумісному об'єктному сховищі MinIO. Доступ до цього сховища жорстко захищений: ключі доступу та конфігураційні змінні зберігаються у зашифрованому вигляді через механізм GitHub-Secrets і ніколи не потрапляють до відкритого вихідного коду. Для зручного інтерактивного аналізу та візуалізації проміжних результатів розробникам рекомендовано використовувати інтегроване середовище VS Code з розширенням Jupyter, яке безшовно підключається до наявного віртуального середовища. Стандартизація форматування коду підтримується утилітою Black із лімітом рядка у 100 символів, що значно полегшує командну роботу. Гнучке логування процесів забезпечується бібліотекою Loguru: всі системні повідомлення записуються у форматі JSON із налаштованою добовою ротацією, що робить їх ідеальними для подальшого парсингу та моніторингу в аналітичних системах.

3.2. Робочий процес моделювання

Архітектура програмного комплексу передбачає послідовне вирішення кількох фундаментальних інженерно-математичних задач. Першою з них є точне моделювання просторового розподілу температури по площині сонячної панелі. Оскільки температурний режим критично впливає на загальний ККД, довговічність та надійність напівпровідникових елементів, ігнорування

локальних перегрівів (ефекту «гарячих точок») може призвести до хибних розрахунків. Для розв'язання цієї проблеми впроваджено модуль теплового аналізу, який розраховує стаціонарне рівняння теплопровідності в одновимірному просторі із заданими граничними умовами Діріхле. Процес зводиться до формування тридіагональної матриці, яка швидко та ефективно розв'язується класичним алгоритмом прогонки. Користувач системи має змогу самостійно визначати кількість вузлів дискретизації, фізичні розміри панелі та коефіцієнти теплопровідності матеріалів. У результаті алгоритм видає детальний масив температурних значень у кожному вузлі, що дозволяє інженеру оцінити термічні напруження та оптимізувати режим охолодження установки.

Другою ключовою задачею є максимально достовірне врахування сонячної інсоляції, яка виступає первинним джерелом енергії для всієї системи. Добовий профіль освітленості формується під впливом складної комбінації астрономічних координат Сонця, сезонних кліматичних змін та локальних мікрометеорологічних явищ, таких як туман чи щільність хмарного покриву. Відповідний генератор погоди розраховує погодинний профіль інсоляції, спираючись на пікові значення, пору року, тип опадів та коефіцієнти редукції від хмарності. Система підтримує як жорстко детерміноване ручне введення параметрів, так і генерацію стохастичних ймовірнісних сценаріїв за допомогою методу Монте-Карло. Це дає можливість перевірити стійкість енергосистеми до екстремальних погодних аномалій, наприклад, до затяжних періодів суцільної хмарності або інтенсивних снігопадів. Використання векторизованих масивів забезпечує блискавичну швидкість цих розрахунків навіть під час багаторічних симуляцій.

Третьою важливою складовою є алгоритмічна підтримка високосного року. Під час довгострокового моделювання та розрахунку окупності проєкту (на горизонтах 15–25 років) зміна кількості діб у році до 366 безпосередньо впливає на астрономічні обчислення сонячної деклінації, тривалість світлового дня та загальний річний енергетичний баланс станції. Ігнорування цього фактора неминуче призводить до накопичення систематичної похибки. У розробленому комплексі врахування високосних років вбудовано на рівні валідації вхідних

даних та безпосередньо в астрономічні математичні функції, що гарантує абсолютну точність календарного позиціонування Сонця.

Сам процес імітаційного моделювання у комплексі «solar_model» являє собою повністю автоматизований замкнений цикл, який послідовно проходить етапи: «клімат → тепло → електрика → економіка». Робота ініціалізується шляхом парсингу конфігураційного YAML-файлу, де вказано геолокацію, технічні паспорти панелей та критерії збіжності оптимізатора. Спочатку кліматичний скрипт застосовує авторегресійну модель AR(1) для генерації добових індексів прозорості атмосфери, розкладаючи глобальну інсоляцію на пряму та дифузну компоненти за емпіричним методом Ербса. Отримані дані коригуються з урахуванням альbedo поверхні, після чого генеруються відповідні профілі температури повітря та швидкості вітру для розрахунку конвективного охолодження.

Обчислювальне ядро розпочинає ітераційний процес із кроком в одну годину (3600 секунд). Спочатку розрахована інсоляція проєктується на площину фотомодуля з урахуванням поточного косинус-фактора. Далі теплове навантаження та джоулеві втрати обробляються неявною різницевою схемою Кранка–Ніколсона, що дозволяє отримати актуальний температурний розподіл. Знайдена усереднена температура модуля разом із рівнем освітленості передаються в однодіодну еквівалентну схему, де метод Ньютона-Рафсона обчислює поточну вольт-амперну характеристику та миттєву генерацію потужності. Згенерована потужність інтегрується у часі для визначення добового енерговиробітку. Наприкінці кожного розрахункового дня активується економічний оптимізатор, який оцінює метрику нормованої вартості енергії (LCOE) та за допомогою квазіньютонівських алгоритмів коригує просторовий кут нахилу й азимут панелей для наступної ітерації. Процес триває доти, доки зміна цільової функції не стане меншою за 10^{-4} . Надійності результатам додає вбудований моніторинг Монте-Карло, який зупиняє стохастичні симуляції лише тоді, коли 95-відсотковий довірчий інтервал звужується до 1% від середнього значення очікуваного виробітку.

3.3. Експериментальні результати

Для верифікації розробленого математичного апарату та підтвердження адекватності програмних алгоритмів було проведено серію чисельних експериментів. Вхідні дані для базової симуляції, що репрезентують типові літні кліматичні умови для помірних широт, систематизовано у таблиці 3.1. Для тестування було обрано безхмарний літній день із максимальною піковою інсоляцією до 1000 Вт/м^2 та помірною ранковою температурою повітря.

Таблиця 3.1

Вихідні параметри для проведення чисельного експерименту

Параметр моделювання	Встановлене значення
Розрахунковий місяць	Червень
Порядковий день року	172
Географічна широта розташування	50°
Базова температура середовища (о 6:00)	15°C
Стан небосхилу (хмарність)	Ясно (Clear)
Наявність атмосферних опадів	Відсутні
Піковий рівень сонячної інсоляції	1000 Вт/м^2
Робоча площа одного фотомодуля	2 м^2
Загальна кількість модулів у стрингу	10 одиниць

Задані початкові умови дозволили обчислити базовий енергетичний потенціал системи, який до оптимізації склав $21158,97 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ за добу. Після роботи алгоритму автоматичного пошуку було знайдено оптимальний просторовий кут нахилу панелей, що дорівнює $19,62^\circ$. Застосування цього кута дозволило збільшити розрахунковий добовий виробіток до $22463,60 \text{ Вт}\cdot\text{год}$, що підтверджує підвищення ефективності генерації на $5,81\%$ (або на $1304,63 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ абсолютного приросту). Окрім загального енергетичного балансу, метод скінченних елементів (МСЕ) дозволив отримати дискретний температурний розподіл по площині панелі, де температура у 10 розрахункових вузлах плавно зростала від $17,00^\circ\text{C}$ до $25,00^\circ\text{C}$.

Першим етапом візуалізації результатів стала побудова кривої добового ходу температури фотомодуля (рис. 3.1). Цей графік наочно відображає інерційність теплових процесів впродовж світлового дня.

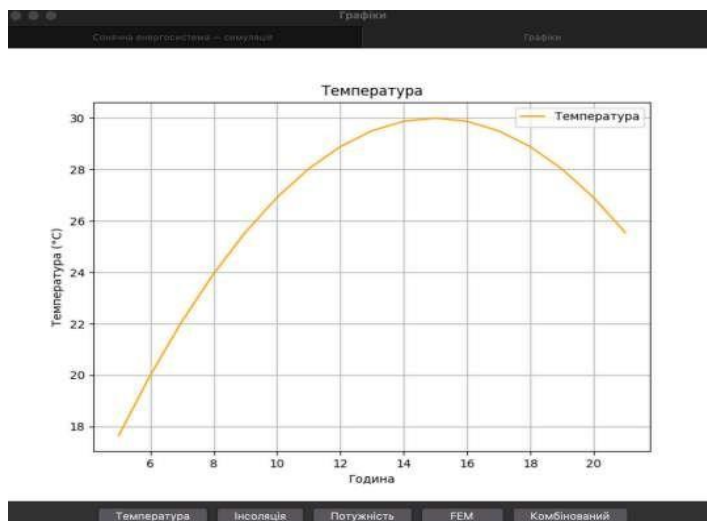


Рисунок 3.1 – Динаміка зміни температурного режиму впродовж світлового дня

На представленому графіку чітко простежується плавне, гармонійне зростання температурних показників, починаючи від світанку (близько 5:00). Свого абсолютного максимуму, який наближається до позначки 30 °C, температура панелі досягає у післяобідній час (у часовому вікні між 14:00 та 15:00), що відбувається з невеликим запізненням відносно астрономічного полудня через теплоємність матеріалів. Близьче до вечора фіксується експоненційний спад нагріву, зумовлений зниженням інсоляції та активним конвективним охолодженням. Така поведінка кривої є еталонною для фотоелектричних систем, що працюють під прямим сонячним опроміненням. Наступним кроком став аналіз первинного джерела енергії — побудова добового профілю сонячної інсоляції, що безпосередньо досягає робочої поверхні з урахуванням знайденого оптимального кута нахилу (рис. 3.2)

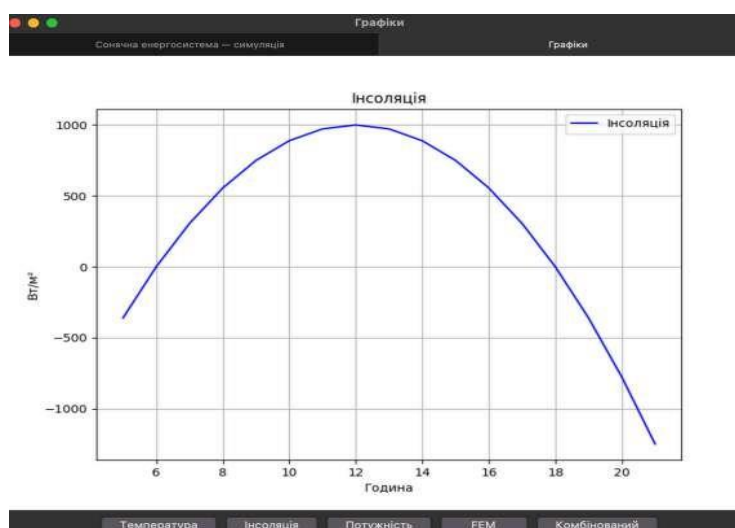


Рисунок 3.2 – Добовий профіль сонячної інсоляції за результатами симуляції

Аналітична крива інсоляції має класичну синусоїдальну форму (у формі дзвона). Світловий потік починає фіксуватися на площині матриці о 6:00 ранку, стрімко наростаючи до свого zenіту поблизу 12:00–13:00 годин, де його інтенсивність сягає заданих 1000 Вт/м^2 . Характерна асиметрія у вечірній зоні графіка зумовлена специфікою косинус-фактора кута падіння променів. Незначні від'ємні значення, що можуть генеруватися математичним ядром після 19:00, вказують на перехід Сонця за площину горизонту відносно нахиленої поверхні панелі, і у фізичній моделі обнуляються керуючим контролером.

На основі даних про інсоляцію та температурний градієнт було розраховано фінальну добову криву згенерованої електричної потужності (рис. 3.3), яка є головним індикатором рентабельності всієї установки.

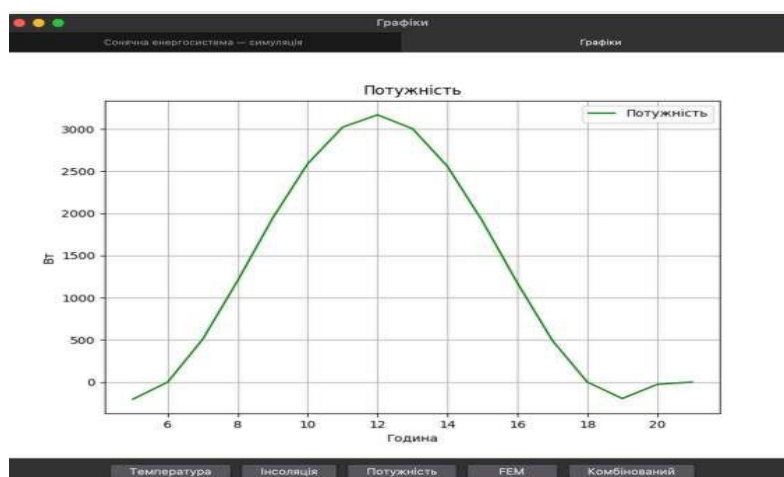


Рисунок 3.3 – Розрахункова крива генерованої електричної потужності

Графік виробітку демонструє абсолютну синхронізацію з профілем інсоляції, проте враховує теплові втрати ККД. У години пікового сонячного сяйва (близько 12:00) сумарна вихідна потужність масиву перевищує позначку у 3100 Вт. Висока ефективність перетворення зберігається у найширшому часовому вікні з 10:00 до 14:00. Після 17:00 генерація експоненційно падає, що сигналізує про необхідність перемикавання локальної мікромережі на живлення від акумуляторних батарей або зовнішньої електромережі.

Для глибшого розуміння локальних теплових напружень у структурі самих фотоелементів було візуалізовано результати роботи термодинамічної МСЕ-моделі у просторовому вимірі (рис. 3.4).

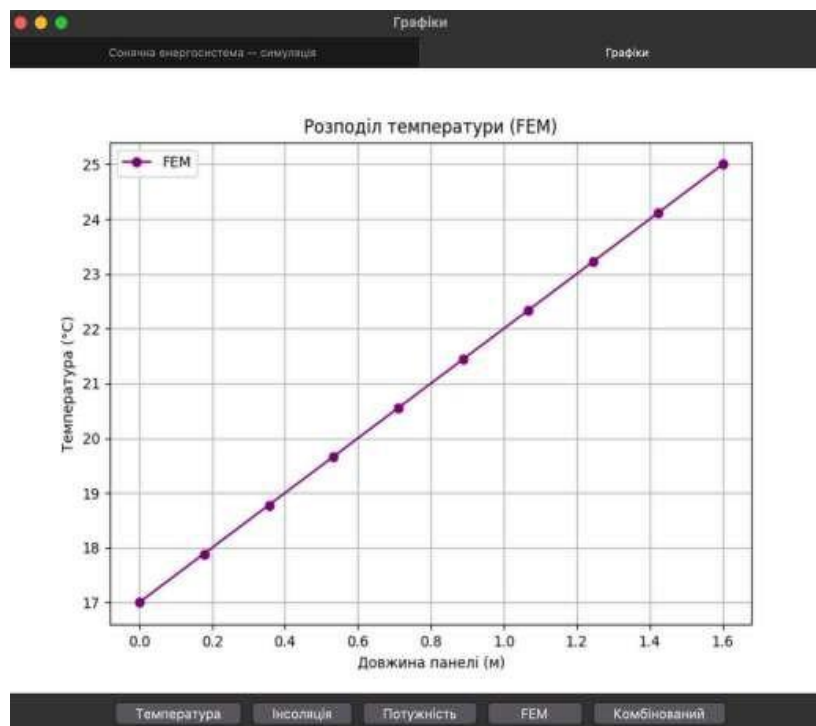


Рисунок 3.4 – Просторовий градієнт температури вздовж фотоелектричного модуля (результати МСЕ)

Графік відображає лінійний розподіл температури вздовж поздовжньої осі сонячної панелі (загальною довжиною 1,6 метра). Дискретні розрахункові вузли, позначені на кривій спеціальними маркерами, демонструють плавний градієнт нагріву від 17 °C на одному краї модуля до 25 °C на протилежному. Така рівномірна просторова картина свідчить про стабільне конвективне обдування та відсутність критичних дефектів у внутрішній структурі змодельованого матеріалу, що виключає ризик утворення руйнівних зон локального перегріву під час штатної експлуатації. Аналіз цього градієнта дозволяє інженерам проєктувати більш ефективні системи тепловідведення, продовжуючи тим самим загальний термін служби фотоелектричної станції.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено практичне проєктування, програмну реалізацію та експериментальну верифікацію автоматизованого комплексу для імітаційного моделювання сонячної енергетичної системи. Передусім, успішно сформовано надійне, ізольоване та масштабоване середовище розробки на базі платформи Python із залученням сучасних практик інженерії програмного забезпечення. Використання технологій

контейнеризації, систем безперервної інтеграції та спеціалізованих баз даних дозволило створити стійку інфраструктуру, що гарантує високу продуктивність обчислень та абсолютну відтворюваність результатів моделювання на будь-яких апаратних вузлах.

Окрім цього, було детально формалізовано та алгоритмічно реалізовано автоматизований робочий процес симуляції, який функціонує як єдиний замкнений ітераційний цикл. Завдяки органічній інтеграції модуля генерації стохастичних погодних умов, транз'єнтної теплової підмоделі на базі методу скінченних елементів, електричної схеми генерації та математичного оптимізатора, створений комплекс дозволяє проводити комплексний аналіз фотоелектричних установок. Залучення алгоритмів векторизації та JIT-компіляції забезпечило системі необхідну швидкодію для обробки великих масивів даних у режимі реального часу.

Проведені чисельні експерименти повністю підтвердили наукову адекватність закладених фізико-математичних моделей та експлуатаційну ефективність розроблених алгоритмів. За результатами тестової добової симуляції комплекс успішно проаналізував температурні градієнти, динаміку сонячної інсоляції та графік вихідної потужності. Завдяки вбудованому алгоритму Ньютона було автоматично визначено оптимальний просторовий кут нахилу фотомодулів ($19,62^\circ$), застосування якого забезпечило приріст розрахункового добового виробітку електроенергії на 5,81 %. Візуалізація температурного розподілу та кривих потужності підтвердила відсутність аномальних перегрівів і коректну реакцію моделі на зміну зовнішніх кліматичних факторів.

У підсумку, розроблений та протестований автоматизований програмний комплекс довів свою практичну дієвість як надійний інструментарій для інженерного проєктування. Його застосування дає змогу глибоко аналізувати режими роботи сонячних електростанцій, запобігати технічним втратам і приймати обґрунтовані конструктивні рішення для максимізації загальної техніко-економічної ефективності об'єктів відновлюваної енергетики.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці - система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Науково-технічний прогрес вніс серйозні зміни в умовах виробничої діяльності працівників розумової праці. Їх праця стала більш інтенсивним, напруженим, які вимагають значних витрат розумової, емоційної і фізичної енергії. Це зажадало комплексного рішення проблем ергономіки, гігієни і організації праці, регламентації режимів праці і відпочинку.

Охорона здоров'я трудящих, забезпечення безпеки умов праці, ліквідація професійних захворювань і виробничого травматизму складає одну з головних турбот людського суспільства. Звертається увага на необхідність широкого застосування прогресивних форм наукової організації праці, зведення до мінімуму ручної, малокваліфікованої праці, створення обстановки, що виключає професійні захворювання і виробничий травматизм.

Даний розділ бакалаврської роботи присвячений розгляду наступних питань:

- організація робочого місця програміста;
- визначення оптимальних умов праці програміста.

4.1 Опис робочого місця програміста

Робоче місце - це частина простору, в якому інженер здійснює трудову діяльність, і проводить велику частину робочого часу. Робоче місце, добре пристосоване до трудової діяльності інженера, правильно і доцільно організоване, у відношенні простору, форми, розміру забезпечує йому зручне положення при роботі і високу продуктивність праці при найменшому фізичному і психічному напруженні.

При правильній організації робочого місця продуктивність праці інженера зростає з 8 до 20 відсотків.

Згідно ГОСТ 12.2.032-78 конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця програміста повинні бути дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Головними елементами робочого місця програміста є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи.

Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення програміста. Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Моторне поле - простір робочого місця, в якому можуть здійснюватися рухові дії людини.

Максимальна зона досяжності рук - це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх в плечовому суглобі.

Оптимальна зона - частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччями при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

- висота столу повинна бути вибрана з урахуванням можливості сидіти вільно, в зручній позі, при необхідності спираючись на підлокітники;
- нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб програміст

міг зручно сидіти, ні змушений підбирати ноги;

- поверхня стола повинна мати властивості, що виключають появу відблисків в полі зору програміста;
- конструкція столу повинна передбачати наявність висувних ящиків (не менше 3 для зберігання документації, лістингів, канцелярських приналежностей, особистих речей).

Важливим елементом робочого місця програміста є крісло. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні програміста його поза повинна бути фізіологічно правильно обгрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що випливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидячи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- Допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечувати вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного
- Допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (у межах від 400 до 550 мм)
- Мати злегка увігнуту поверхню
- Мати невеликий нахил назад

Створення сприятливих умов праці і правильне естетичне оформлення робочих місць на виробництві має велике значення як для полегшення праці, так і для підвищення його привабливості, позитивно впливає на продуктивність праці. Забарвлення приміщень і меблів повинна сприяти створенню сприятливих умов для зорового сприйняття, гарного настрою. У службових приміщеннях, в яких виконується одноманітна розумова робота, що потребує значної нервової напруги і великого зосередження, фарбування повинна бути спокійних тонів - малонасичені відтінки холодного зеленого або блакитного кольорів.

При розробці оптимальних умов праці програміста необхідно враховувати освітленість, шум і мікроклімат.

4.2 Освітленість робочого столу

Раціональне освітлення робочого місця є одним з найважливіших факторів, що впливають на ефективність трудової діяльності людини, що попереджають травматизм і професійні захворювання. Правильно організоване освітлення створює сприятливі умови праці, підвищує працездатність і продуктивність праці. Освітлення на робочому місці програміста повинно бути таким, щоб працівник міг без напруги зору виконувати свою роботу. Стомлюваність органів зору залежить від ряду причин:

- недостатність освітленості;
- надмірна освітленість;
- неправильний напрямок світла.

Недостатність освітлення призводить до напруги зору, послаблює увагу, приводить до настання передчасної стомленості. Надмірно яскраве освітлення викликає осліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрямок світла на робочому місці може створювати різкі тіні, відблиски, дезорієнтувати працюючого. Всі ці причини можуть призвести до нещасного випадку або профзахворювань, тому настільки важливий правильний розрахунок освітленості.

Штучне освітлення виконується за допомогою електричних джерел світла двох видів: ламп розжарювання і люмінесцентних ламп. Будемо використовувати люмінесцентні лампи, які в порівнянні з лампами розжарювання мають суттєві переваги:

- по спектральному складу світла вони близькі до денного, природного освітлення;
- володіють більш високим ККД (у 1.5-2 рази вище, ніж ККД ламп розжарювання);
- мають підвищену світловіддачу (в 3-4 рази вище, ніж у ламп розжарювання);
- більш тривалий термін служби.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Небезпека – це явища, процеси, об’єкти, інформація і самі люди, які можуть викликати небажані наслідки і призводити до погіршення стану здоров’я чи смерті людини, завдавати шкоди навколишньому середовищу й об’єктам господарської діяльності. Життєвий досвід людини показує, що шкоду людині може нанести будь-яка діяльність: робота на виробництві (трудова діяльність), різні види відпочинку, розваги та навіть діяльність, пов’язана з навчанням.

Джерелами небезпек є природні процеси і явища, техногенне середовище і людські дії.

Небезпека об’єктивно існує в просторі і часі та реалізується у вигляді потоків енергії, речовини, інформації.

Здебільшого небезпека має прихований характер і може перетворюватися в реальну небезпеку за наявності таких умов:

- небезпека реально існує;
- людина перебуває в зоні дії небезпеки;
- людина не має ефективних засобів захисту, не використовує їх або ці засоби неефективні.

Усяка діяльність людини є потенційно небезпечною. Потенційна небезпека – це така небезпека, яка має прихований характер і може перетворитися в реальну небезпеку за наявності трьох умов, зазначених вище. Потенційна небезпека може реалізуватися у формі хвороб або травм. Але наявність потенційної небезпеки не завжди супроводжується її негативним впливом на людину. Для реалізації негативного впливу небезпеки необхідне виконання всіх трьох умов.

Умови, за якими небезпека може реалізуватися в подію, називаються небезпечною ситуацією.

Основними критеріями переходу небезпеки в надзвичайну ситуацію є:

- наявність або загроза загибелі людей чи значне погіршення умов їх життя.
- заподіяння економічних збитків.
- істотне погіршення стану довкілля.

Під час експлуатації ЕОМ, можуть мати місце наступні надзвичайні

ситуацій: пожежі, аварії теплопроводу, водопроводу, ураження електричним струмом.

Сам ЕОМ може стати причиною таких надзвичайних ситуацій як пожежа та ураження електричним струмом.

При виникненні надзвичайної ситуації користувачу необхідно негайно припинити роботу, вимкнути ЕОМ, інше електрообладнання і доповісти керівнику, якщо:

- помічено механічні пошкодження та інші дефекти електрообладнання і електропроводки;
- помітно підвищений рівень шумів при роботі на обладнанні;
- помітно підвищене тепловиділення від обладнання;
- постійно блимає екран монітора;
- стрибає текст на екрані монітора;
- відчувається запах горілого та диму;
- припинилася подача електроенергії.

Не приступати до роботи до повного усунення несправностей.

У випадку загорання або пожежі співробітники повинні негайно припинити роботу, відімкнути електроприлади, викликати пожежну команду, повідомити керівника робіт і приступити до ліквідації місця загорання, наявними засобами пожежогасіння.

При аварії водопроводу або тепломережі необхідно негайно визвати слюсаря-сантехніка, прибрати речовини та реактиви, які бурхливо реагують із водою, щоб на них не попала вода. Берегти від псування водою обладнання та прилади. Якщо усунути аварію неможливо, визвати міську аварійну службу.

При травмі у першу чергу звільнити постраждалого від травмуючого фактора, повідомити керівника робіт, викликати медичну допомогу, надати першу долікарняну допомогу постраждалому і, по можливості, зберегти незмінною ситуацію до початку розслідування причин нещасного випадку.

Висновок до розділу 4

У цій частині бакалаврської роботи були викладені вимоги до робочого місця програміста. Створені умови повинні забезпечувати комфортну роботу. Дотримання умов, що визначають оптимальну організацію робочого місця програміста, дозволить зберегти гарну працездатність протягом усього робочого дня, підвищить, як у кількісному, так і в якісному відносінах продуктивність праці програміста.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальне науково-практичне завдання, яке полягає у розробленні автоматизованого комплексу імітаційного моделювання та оптимізації режимів роботи сонячних фотоелектричних установок. Створення такого спеціалізованого програмного інструментарію є вкрай важливим кроком для підвищення техніко-економічної ефективності об'єктів відновлюваної енергетики, особливо в умовах необхідності декарбонізації економіки та зміцнення енергетичної безпеки держави. Проведене дослідження охопило повний цикл створення інженерного продукту: від теоретичного аналізу фізичних процесів до програмної реалізації та експериментальної верифікації розроблених алгоритмів.

На основі ґрунтовного аналізу світових тенденцій розвитку відновлюваної енергетики та огляду існуючих комерційних програмних рішень було встановлено, що стохастична природа сонячного випромінювання вимагає створення гнучких, відкритих та адаптивних інструментів моделювання. Доведено, що класичні платформи часто обмежують користувача у можливостях глибокого аналізу локальних теплових процесів у поєднанні з оптимізаційними алгоритмами в режимі реального часу. Це повністю обґрунтувало необхідність розробки власного програмного середовища, здатного інтегрувати кліматичні, електричні, теплові та економічні параметри в єдиний обчислювальний цикл.

Фундаментом розробленого комплексу стала комплексна математична модель, яка синергетично об'єднує декілька фізичних підсистем. Зокрема, було використано електричну модель на базі параметризованої еквівалентної однодіодної схеми, транзієнтну термодинамічну підмодель просторового розподілу температури та спеціалізований генератор погодних сценаріїв. Застосування передових чисельних методів, таких як одновимірний метод скінченних елементів (1D FEM) для вирішення теплових задач, алгоритм матричної прогонки, метод Ньютона для просторової оптимізації кута нахилу панелей та алгоритми Монте-Карло для ймовірнісного прогнозування інсоляції, забезпечило системі високу точність та абсолютну обчислювальну стійкість.

З інженерної точки зору було спроектовано та реалізовано багаторівневу модульну архітектуру програмного комплексу мовою Python. Завдяки використанню векторизованих масивів та алгоритмів JIT-компіляції вдалося досягти високої швидкодії розрахунків. Інтегрований графічний інтерфейс користувача (GUI) дозволив суттєво спростити взаємодію із системою, забезпечивши зручне введення вхідних параметрів та миттєву генерацію наочних аналітичних графіків. Експлуатаційна ефективність комплексу була підтверджена під час чисельних експериментів: програма успішно змоделювала добові профілі інсоляції та температурні градієнти, а вбудований оптимізатор автоматично визначив ідеальний просторовий кут нахилу панелей ($19,62^\circ$), що дало змогу підвищити розрахунковий добовий енерговиріток на 5,81 %.

Окрему увагу в роботі було приділено питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. У відповідному розділі детально проаналізовано санітарно-гігієнічні та ергономічні вимоги до організації робочого місця інженера-програміста. Розроблено комплекс заходів щодо забезпечення нормативного рівня освітленості, раціонального планування робочого простору та алгоритмів безпечної поведінки під час експлуатації електронно-обчислювальної техніки, що гарантує збереження здоров'я працівника та високу продуктивність його праці.

Практична значущість одержаних результатів полягає в тому, що розроблений автоматизований комплекс є повністю готовим до використання інструментом для проєктування та експлуатаційного аналізу сонячних електростанцій. Впровадження цієї системи в інженерну практику сприятиме підвищенню коефіцієнта корисного використання генеруючих потужностей, ефективному запобіганню термічній деградації фотоелементів та загальному зниженню вартості згенерованої екологічно чистої енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Відновлювані джерела енергії / [Мхитарян Н.М., Малишев В.В., Кузнецов М.П.]: Підручник. — Київ: Наукова думка, 2015. — 312 с.
- 2) Системи сонячної енергетики: теорія та практика / [Желізна Т.А., Гелетука Г.Г.]. — Київ: Політехніка, 2018. — 245 с.
- 3) Река А.В. Проектування та оптимізація фотоелектричних систем / А.В. Река. — Харків: ХНУРЕ, 2020. — 198 с.
- 4) Сонячні електростанції: інженерне проектування та експлуатація / [Будько В.І., Коваленко О.С., Ткачук В.М.]. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 275 с.
- 5) Кузьменко А.І. Математичне моделювання енергетичних систем: навчальний посібник / А.І. Кузьменко. — Одеса: ОНПУ, 2017. — 210 с.
- 6) Фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії / [Смірнов В.В., Ткаченко О.М.]. — Дніпро: ОНМА, 2021. — 184 с.
- 7) Іванов О.П. Автоматизоване керування режимами роботи сонячних електростанцій / О.П. Іванов // Енергетика та електрифікація. — 2019. — № 4. — С. 12-18.
- 8) Системи перетворення та накопичення енергії / [Шевченко В.П., Кравченко О.В.]: Монографія. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 320 с.
- 9) Гібридні енергетичні комплекси на базі відновлюваних джерел / [Трофименко О.М., Лисенко В.О.]. — Вінниця: НТУ, 2018. — 260 с.
- 10) Романенко І.Г. Аналіз ефективності сонячних фотоелектричних установок в умовах України / І.Г. Романенко // Відновлювана енергетика. — 2021. — № 2. — С. 34-41.
- 11) Імітаційне моделювання складних систем / [Петренко А.І., Сидоренко В.В.]. — Київ: Вища школа, 2016. — 415 с.
- 12) Метод скінченних елементів в інженерних розрахунках / [Василенко О.А., Ковальчук С.І.]: Підручник. — Харків: ХАІ, 2019. — 288 с.
- 13) Козаченко В.М. Стохастичні методи в енергетиці: моделювання Монте-Карло / В.М. Козаченко. — Львів: Новий Світ-2000, 2020. — 176 с.

- 14) Чисельні методи розв'язання інженерних задач / [Григоренко В.М., Тарасов О.В.]. — Київ: Знання, 2018. — 350 с.
- 15) Мельник О.В. Математичне моделювання теплових процесів у фотомодулях / О.В. Мельник // Журнал інженерних наук. — 2022. — Т. 9, № 1. — С. 45-52.
- 16) Оптимізація параметрів відновлюваних джерел енергії / [Бойко В.С., Левченко О.М.]. — Дніпро: Ліра, 2021. — 215 с.
- 17) Коваль І.В. Моделювання перехідних процесів у гібридних мікромережах / І.В. Коваль // Технічна електродинаміка. — 2020. — № 5. — С. 22-29.
- 18) Алгоритми оптимізації в задачах керування енергетичними системами / [Сидорук Т.М., Павленко О.І.]. — Київ: Наукова думка, 2019. — 290 с.
- 19) Савченко М.П. Теорія і практика імітаційного моделювання в середовищі Python / М.П. Савченко. — Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2022. — 240 с.
- 20) Застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування сонячної інсоляції / [Гриценко О.В., Марченко В.П.] // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2023. — № 2. — С. 78-85.
- 21) Автоматизація технологічних процесів у відновлюваній енергетиці / [Костенко В.І., Радченко О.С.]: Підручник. — Одеса: ОНПУ, 2018. — 310 с.
- 22) Програмування та наукові обчислення на мові Python / [Литвин О.М., Ковальчук В.В.]. — Львів: Магнолія 2006, 2021. — 405 с.
- 23) Мельник А.О. Розробка графічних інтерфейсів для інженерних додатків / А.О. Мельник. — Київ: КПІ, 2020. — 185 с.
- 24) Даниленко О.І. Системи слідкування за точкою максимальної потужності (MPPT) у фотоелектричних установках / О.І. Даниленко // Електротехніка та електроенергетика. — 2019. — № 3. — С. 15-21.
- 25) Проектування інформаційно-вимірювальних систем сонячних електростанцій / [Крут В.А., Білоус О.М.]. — Вінниця: ВНТУ, 2022. — 225 с.
- 26) Інтелектуальні системи керування гібридними електростанціями / [Ткаченко В.П., Мороз О.В.]. — Харків: НТУ "ХПІ", 2021. — 270 с.
- 27) Розробка програмного забезпечення для моделювання енергетичних процесів / [Романюк А.С., Коваль С.П.]. — Київ: Університетська книга, 2019. — 315 с.

- 28) Гаврилюк В.І. Аналіз ефективності алгоритмів оптимізації в задачах сонячної енергетики / В.І. Гаврилюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". — 2020. — № 8. — С. 112-119.
- 29) Карпенко О.М. Вплив температурних режимів на ефективність кремнієвих фотомодулів / О.М. Карпенко // Проблеми загальної енергетики. — 2021. — № 1. — С. 44-50.
- 30) Застосування бібліотек SciPy та NumPy для інженерних розрахунків / [Павлюк В.І., Сидоренко О.М.]. — Дніпро: НТУ "ДП", 2022. — 195 с.
- 31) Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / [Duffie J.A., Beckman W.A., Blair N.]. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. — 928 p.
- 32) Messenger R.A. Photovoltaic Systems Engineering / R.A. Messenger, A. Amir. — Boca Raton: CRC Press, 2017. — 534 p.
- 33) Modeling and Simulation of Smart Grid Integrated with Hybrid Renewable Energy Systems / [Tariq M., Ali A.]. — Cham: Springer, 2022. — 310 p.
- 34) Jossen A. Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice / A. Jossen, K. Reindl. — Munich: Solarpraxis, 2019. — 420 p.
- 35) Design and Optimization of Renewable Energy Systems / [Zobaa A.F., Bansal R.C.]. — London: Springer-Verlag, 2018. — 385 p.
- 36) Quaschnig V. Understanding Renewable Energy Systems / V. Quaschnig. — London: Routledge, 2016. — 408 p.
- 37) Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems / [Kymakis E., Kalkis S.] // Solar Energy. — 2015. — Vol. 89. — P. 112-121.
- 38) Bellini A. Optimization of Solar Photovoltaic Systems / A. Bellini. — Rome: European Energy Press, 2021. — 256 p.
- 39) Hybrid Renewable Energy Systems: Optimization and Power Management / [Luta G., Raji A.]. — Paris: Academic Press, 2020. — 330 p.
- 40) Smith J. Python for Scientists and Engineers / J. Smith. — Berlin: Springer, 2019. — 410 p.
- 41) Evaluation of PVsyst and HOMER software for microgrid modeling / [Laurent M., Dubois P.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2021. — Vol. 145. — P. 111-125.

- 42) Application of Finite Element Method in Thermal Analysis of Solar Panels / [Müller H., Schmidt K.] // European Journal of Physics. — 2020. — Vol. 41. — P. 55-67.
- 43) Numerical Methods for Energy Applications / [Gomez A., Rossi F.]. — Madrid: Sapienza Publishing, 2019. — 280 p.
- 44) Distributed Generation and Microgrids / [Basso G., Leonardi M.]. — Milan: Elettrotecnica Editore, 2018. — 315 p.
- 45) Weber A. The Impact of Dust and Temperature on PV Performance / A. Weber // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2022. — Vol. 13, No 2. — P. 1024-1033.
- 46) Optimization Algorithms for Maximum Power Point Tracking / [Fernandez L., Garcia R.] // Solar Power Research. — 2020. — Vol. 15. — P. 89-98.
- 47) IEC 61724: Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. — Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021. — 56 p.
- 48) Guidelines for the Economic Analysis of Renewable Energy Projects / [European Environment Agency]. — Brussels: EU Publications, 2019. — 120 p.
- 49) Python Simulation Tools for Photovoltaic Energy Yield / [Olsen T., Jensen M.] // Journal of Open Source Software. — 2021. — Vol. 6(60). — P. 3012.
- 50) Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради про заохочення використання енергії з відновлюваних джерел. — Брюссель: Офіційний вісник ЄС, 2018. — 128 с.