

аналіз НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мельник Роман Володимирович

УДК 004.942

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ
ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ЗА НАЯВНОСТІ
ПОНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

122 – Комп'ютерні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ Мельник Р. В.

Науковий керівник – Медиковський Микола Олександрович, доктор технічних наук, професор

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Мельник Роман Володимирович. Інформаційна технологія управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2021.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання: підвищення ефективності управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання за наявності акумулюючого елемента шляхом розроблення інформаційної технології підтримки прийняття рішень.

У першому розділі проведено аналіз сучасних підходів до управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системами електропостачання за наявності акумулюючого елемента. Визначено основні вимоги і проблеми, які виникають в процесі управління, на основі яких сформовано задачі дослідження.

Для забезпечення балансу виробництва та споживання електроенергії з врахуванням обмежень диспетчера мережі і в умовах динамічних змін параметрів зовнішнього середовища (швидкість вітру, інтенсивність сонячної радіації, тощо) актуальною є задача визначення активного складу, тобто набору вітрових електроустановок або сонячних панелей, які б забезпечили енергетичний баланс з врахуванням їх ефективності.

Проведено аналіз існуючих способів формалізації і методів визначення активного складу вітрової електричної станції. Встановлено, що на даний момент модифікований метод динамічного програмування показує одні з найкращих результатів за точністю розв’язку і швидкодією. Обґрунтовано можливість застосування штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів, для розв’язання задачі знаходження активного складу.

В другому розділі досліджено процес управління енергодинамічними

режимами гібридної системи енергопостачання за наявності акумулюючого елемента. На основі аналізу сучасних підходів до управління гібридними системами розроблено набір продукційних правил, що дозволяє визначити моменти реалізації керуючих впливів з метою зміни режимів роботи елементів гібридної системи енергопостачання.

Розроблено модель процесів заряду-розряду акумулюючого елемента, що використовується для дослідження роботи гібридної системи електропостачання і формування рекомендацій для оператора. Модель розроблена з врахуванням особливостей режиму заряду CC/CV і обмежень на потужність заряду-розряду. Модель дозволяє досягнути задовільної коректності за меншої обчислювальної складності. Для перевірки коректності розробленої моделі використано еквівалентну схему акумулюючого елемента. Результати комп'ютерного моделювання показали, що середнє відхилення між обмеженнями на потужність заряду-розряду для розробленої моделі і еквівалентної схеми акумулюючого елемента складає 1% при заряді і 6% при розряді.

Для оцінки кількості електроенергії, що може бути згенерована сонячними панелями за заданий проміжок часу у заданій географічній точці, розроблено метод короткочасного прогнозування. Вхідними параметрами методу є дані метеорологічних спостережень і прогнозована хмарність для заданого періоду часу. Розроблений метод дозволяє оцінити кількість електроенергії, що може бути вироблена у майбутньому сонячними панелями.

Одним з елементів методу прогнозування є розроблена модель процесів перетворення сонячної енергії. Вона дозволяє визначити потужність сонячних панелей з врахуванням просторових параметрів сонячної електричної станції. Вхідними даними моделі є: позиція сонця на небі (кут нахилу, азимут); сумарна інтенсивність сонячної радіації, що падає на сонячні панелі; коефіцієнт корисної дії сонячних панелей; геометричні параметри панелей (кут нахилу, азимут сонячних панелей, відстань між рядами).

В третьому розділі досліджено ефективність застосування штучних

нейронних мереж і генетичних алгоритмів для розв'язання задачі визначення активного складу вітрової електричної станції. Задача визначення активного складу полягає в знаходженні такого набору ввімкнутих вітрових електричних установок, щоб мінімізувати відхилення між навантаженням, яке необхідно згенерувати, і потужністю вітрової електричної станції, а також максимізувати коефіцієнт ефективності активного складу. Коефіцієнт ефективності активного складу – це узагальнюючий критерій активного складу, що враховує такі параметри, як: кількість виробленої енергії, технічний стан кожної вітрової електричної установки, кількість включень та виключень, час напрацювання, і інші.

Системний аналіз застосування штучних нейронних мереж обґрунтував перспективність використання повнорекурентних нейронних мережі і нейронних мереж Хопфілда для розв'язання задач визначення активного складу вітрової електричної станції. Для визначення оптимальної конфігурації повнорекурентної нейронної мережі досліджено три топології мережі і три способи навчання: без вчителя; з вчителем, роль якого виконує метод повного перебору; з вчителем роль якого виконує модифікований метод динамічного програмування.

Для визначення оптимальної конфігурації генетичного алгоритму досліджено комбінації з восьми методів селекції, трьох операторів схрещування і двох операторів мутації. Аналіз результатів обґрунтував перспективність таких комбінацій комбінації, як: лінійно рангового селектора з рівномірним схрещуванням; турнірного селектора з рівномірним схрещуванням.

Для перевірки ефективності досліджуваних методів, проведено комп'ютерне моделювання роботи системи управління енергетичними режимами вітрової електричної станції, з використанням таких методів, як: модифікований метод динамічного програмування; рекурентні нейронні мережі; генетичні алгоритми.

На основі аналізу отриманих результатів, обґрунтовано можливості

застосування кожного з методів знаходження активного складу для забезпечення необхідного часу розв'язання задачі і допустимого розміру небалансу потужностей.

З метою дослідження впливу ємності акумулюючого елемента на середнє значення небалансу потужностей, тобто на різницю між сумарною генерацією електроенергії та графіком навантаження, проведено комп'ютерне моделювання режимів роботи гібридної системи електропостачання для двох моделей акумулюючого елемента (розроблена модель, еквівалентна схема акумулюючого елемента) і для трьох методів визначення активного складу (модифікований метод динамічного програмування, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми). Отримані результати дозволяють обґрунтувати енергетичну ємність акумулюючого елемента необхідну для забезпечення допустимого небалансу потужностей.

У четвертому розділі розроблено елементи інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання. В процесі розробки використано фреймворк Spring Boot, а також шаблони проектування: модель-представлення-контролер (MVC); стратегія; одинак; проксі; фабрика.

При розробці використовувалися такі засоби, як: мова програмування Java; середовище розробки IntelliJ IDEA для мови програмування Java; фреймворки Spring Boot, що реалізує принцип інверсії залежностей; шаблон проектування MVC для організації архітектури системи.

Основна задача системи підтримки прийняття рішень – це надання рекомендацій оператору гібридної системи електропостачання, щодо управління енергодинамічними режимами роботи з метою дотримання графіка навантаження. Для цього необхідно визначати активний склад вітрової електричної станції, для цього програмно реалізовано набір таких методів, як: метод повного перебору; метод гілок і границь; метод динамічного програмування; модифікований метод динамічного програмування; штучні

нейроні мережі; генетичні алгоритми. Розроблений елементи інформаційної технології інтегровано з SCADA-системою. SCADA-система використовується для збору, опрацювання і представлення даних оператору гібридної системи енергопостачання.

Ключові слова: гібридна система енергопостачання, активний склад вітрової електричної станції, рекурентна нейрона мережа, генетичний алгоритми, акумулюючий елемент, система підтримки прийняття рішень.

ABSTRACT

Melnyk R. V. Information technology for control of energy-dynamic modes in the presence of renewable energy sources. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of the Doctor of Philosophy on the specialty 122 “Computer science” (12 – Information technologies). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

Abstract content

In the dissertation the actual scientific task is solved: increase of efficiency of management of energy-dynamic modes of hybrid wind-solar power supply system in the presence of a accumulating element by development of information technology for decision support system.

The first section analyzes the modern approaches to the control of energy-dynamic regimes of hybrid wind-solar power supply systems in the presence of a storage element. The main tasks and problems that arise in the management process are identified, on the basis of which the list of main research tasks is formed.

The capacity of wind, solar or hybrid power systems may be limited by the network manager in order to maintain the energy balance. In terms of electricity production in accordance with the limitations of the network manager and in terms of changes in environmental parameters (wind speed, solar radiation intensity, etc.) the

task of determining the active composition, a set of wind turbines or solar panels that would ensure energy balance taking into account their efficiency.

The analysis of existing methods of formalization and methods of determining the active composition of a wind power plant is carried out. It has been found that the modified dynamic programming method currently shows some of the best results in terms of accuracy and speed. It is substantiated that the use of such as artificial neural networks and genetic algorithms to solve the problem of finding the active composition is a promising area of research.

The relevance of the dissertation topic is confirmed, the goal is formulated and the content of the tasks that need to be solved to achieve this goal is specified.

The second section investigates the process of control of energy-dynamic modes of a hybrid power supply system in the presence of a storage element. Based on the analysis of modern approaches to the management of hybrid systems, a set of production rules has been developed, which allows to substantiate the moments of implementation of control influences in order to change the modes of operation of the elements of the power supply system.

A model of the charge-discharge process of the accumulating element is used, which is used to model the operation of the hybrid power supply system and to form recommendations for the dispatcher. In contrast to the existing models, which require a large number of nonlinear dependences and various electro physical parameters, the developed model allows to achieve satisfactory accuracy with fewer computing. To check the correctness of the developed model, a model based on an equivalent scheme was used. The results of computer simulations showed that the average difference between the charge-discharge power limits for the developed model and the model based on the equivalent scheme is 1% for charge and 6% for discharge.

The statistical analysis of data of intensity of solar radiation for several regions of Ukraine is carried out, the average value of coefficient of transparency of the atmosphere for these regions is specified. The obtained results allow to specify the

expected capacity of solar panels for specific regions of Ukraine, which is necessary when designing hybrid power supply systems.

To estimate the amount of electricity that can be generated by solar panels for a given period of time for a given geographical point, a prediction method has been developed. The developed method allows to estimate "the day in advance" the amount of electricity that can be produced in one day by solar panels. Prediction is made using meteorological data on clouds in a given period of time and the history of meteorological observations.

One of the elements of the prediction method is the developed model of solar energy conversion processes. The developed model allows to determine the power of solar panels taking into account the peculiarities of the location of rows of solar panels. The input data of the model are: the position of the sun in the sky (angle, azimuth); the total intensity of solar radiation falling on solar panels; efficiency of solar panels; geometric parameters of solar panels (angle, azimuth of solar panels, distance between rows).

The obtained results were used in the development of information technology for the decision support system in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems.

The third section uses artificial neural networks and genetic algorithms to solve the problem of determining the active composition of a wind power plant. The task of determining the active composition is to find such a set of wind power plants, so as to minimize the deviation between the load to be generated and the power of the wind power plant, as well as to maximize the efficiency of the active composition. The efficiency of the active composition is a generalized criterion of the active composition, which takes into account such parameters as: the amount of energy produced, technical condition, the number of inclusions and exclusions, operating time, and others.

Full-recurrent neural networks were used to determine the active composition. Three network topologies and three learning methods have been studied: without a teacher; with the teacher, whose role is performed by the method of complete search;

with the teacher whose role is performed by a modified method of dynamic programming.

To determine the optimal configuration of the genetic algorithm, combinations of eight selection methods, three crossing operators, and two mutation operators were investigated. The best results were shown by two combinations: a combination of a linear-rank selector with uniform crossing; combination of tournament selector with uniform crossing.

To test the effectiveness of the studied methods, computer modeling of the power control system of the wind power plant, using each of the methods, namely: a modified method of dynamic programming; recurrent neural networks; genetic algorithms.

Based on the analysis of the obtained results, the choice of the method of finding the active composition is substantiated taking into account the parameters of the problem solving time and the allowable size of the power imbalance. The obtained results were used in the process of designing a decision support system in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems.

In order to study the effect of storage capacity on the average power deviation, ie the difference between total electricity generation and load schedule, computer simulations of the modes of operation of the hybrid power supply system for two models of the storage element (developed model, model based on equivalent circuit) and for three methods for determining the active composition (modified method of dynamic programming, artificial neural networks, genetic algorithms). The obtained results allow to substantiate the energy capacity of the accumulating element taking into account the allowable size of the power imbalance.

The fourth section develops elements of information technology for decision support in the management of energy-dynamic modes of hybrid power supply systems. The Spring Boot framework was used in the development process, as well as design templates: Model-view-controller (MVC); strategy; singleton; proxy; factory.

The development used such tools as: Java programming language; IntelliJ IDEA development environment for Java programming language; Spring Boot frameworks, which implements the principle of dependence inversion; MVC design template for system architecture organization.

The main task of the decision support system is to provide recommendations to the dispatcher of the hybrid power supply system on the management of energy-dynamic modes of operation in terms of limiting the generated power in accordance with the load schedule. To do this, it is necessary to quickly determine the active composition of the wind power plant, for this purpose a set of methods such as: full search method, branch and boundary method, dynamic programming method, modified dynamic programming method, artificial neural networks, genetic algorithms. Developed elements of information technology are integrated with the SCADA-system. The SCADA system is used to collect, process and present data to the hybrid power system manager.

Key words: hybrid power supply system, active composition of wind power station, recurrent neural network, genetic algorithms, battery energy storage systems (BESS), decision support system.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. N. Shakhovska Optimization of the Active Composition of the Wind Farm Using Genetic Algorithms / N. Shakhovska, M. Medykovskyy, R. Melnyk, N. Kryvinska // Tech Science Press (TSP) 2021. – Volume 69, Number 3.– pp. 3065-3078
2. M. Medykovskyy Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS) / M. Medykovskyy, R. Melnyk // Journal of Computational Problems of Electrical Engineering 2021.– Volume 11, Number 1.
3. Медиковський М. О. Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції / Медиковський М. О., Мельник Р. В., Дубчак М. А. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі» 8 - SISN. 2020; Випуск 8: сс. 55 – 64
4. Melnyk R. Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems / M. Medykovskyy, R. Melnyk // Econtechmod. An international quarterly journal – 2018, vol. 07, no. 3, 33 - 38
5. Kravchyshyn V. Optimization of wind farm structure control / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk, M. Dilai // Advances in Intelligent Systems and Computing II.– Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017.– Springer.– Vol. 689.– pp. 320-333
6. Kravchyshyn V. Modification of the dynamic programming method for determining active structure of wind power plant / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk // Journal of Computational Problems of Electrical Engineering 2016.– Volume 6, Number 2.– pp. 83-90
7. Медиковський М.О. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів / Медиковський М.О., Кравчишин В.С., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016.– т. 26, № 7 .– с. 291 – 298

8. Melnyk R. Research of the energy-dynamic modes in power supply systems with the battery energy storage system / Medykovskyy M., Melnyk R. // VIII International Scientific and Practical Conference "current trends of modern scientific research", March 14-16, 2021 Munich, Germany, pp. 210-218
9. Медиковський М. О. Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента / Медиковський М. О., Мельник Р. В. // Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2021, pp. 466-471
10. Melnyk R. Method of optimizing the parameters of the photovoltaic solar power plant / Medykovskyy M., Melnyk R. // Computer Science and Information Technologies XIV International Scientific and Technical Conference.– м. Львів, Україна.– 17-20 вересня 2019 року: тези конференції. Львів. 2019.– с. 72-75
11. Мельник Р. В. Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій / Мельник Р. В. // 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні».– м. Львів, Україна.– 4-5 квітня 2019 року

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	15
Вступ	17
1. Аналіз методів та засобів управління енергодинамічними режимами гібридних вітро-сонячних систем електропостачання	24
1.1 Перспективи розвитку та особливості режимів роботи відновлювальних джерел енергії	24
1.2 Структура і функціональні можливості гібридних систем енергопостачання	29
1.3 Аналіз методів моделювання режимів роботи акумулюючого елемента.....	33
1.4 Методи і засоби контролю та управління гібридними вітро-сонячними системи електропостачання	37
1.4.1 Методи обґрунтування активного складу вітрових електричних станцій	37
1.4.2 Управління сонячними електричними станціями.....	44
1.5 Прогнозування потужності відновлювальних джерел енергії.....	47
Висновки до розділу 1	51
2. Моделювання енергодинамічних режимів елементів гібридних систем електропостачання	544
2.1 Розроблення бази продукційних правил для прийняття рішень на управління режимами	544
2.2 Розроблення моделі процесів заряду-розряду акумулюючого елемента	599
2.3 Моделювання режиму перетворення сонячної енергії.....	677
2.4 Розроблення методу короткотермінового прогнозування інтенсивності сонячної радіації.....	777
Висновки до розділу 2	83
3. Дослідження елементів інформаційної технології управління енергодинамічними режимами	854
3.1 Формулювання завдання визначення активного складу вітрових електричних установок	854
3.2 Застосування нейронних мереж для визначення активного складу вітрової електричної станції	876
3.3 Застосування генетичних алгоритмів для визначення активного складу вітрової електричної станції	944
3.4 Дослідження впливу енергетичної ємності акумулюючого елемента на розмір небалансу потужностей	1055
3.5 Визначення коефіцієнта прозорості атмосфери для конкретних географічних координат.....	1154
Висновки до розділу 3	119
4. Розроблення інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами вітро-сонячної електростанцій.....	12120
4.1 Обґрунтування засобів розробки	12120

4.1.1 Патерни проектування	12221
4.1.2 Фреймворк Spring Boot.....	1254
4.1.3 Сторонні бібліотеки	1287
4.1.4 Стандарти і технології взаємодії між компонентами системи	1298
4.2 Архітектура системи підтримки прийняття рішень.....	1309
4.2.1 Модель збору та попередньої обробки інформації.....	142
4.3 Статистичний аналіз отриманих результатів	Error! Bookmark not defined. 4
Висновки до розділу 4	Error! Bookmark not defined. 54
Основні результати та висновки	15655
Список використаних джерел	15857
Додаток А.....	17271
Додаток Б	Error! Bookmark not defined. 73
Додаток В.....	17478

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Позначення	Пояснення
API	прикладний програмний інтерфейс
COM	модель компонентного об'єкта
MVC	архітектурний шаблон, який використовується для проектування програмного забезпечення та передбачає поділ на три взаємопов'язані частини: модель даних, вигляд та модуль керування.
OLE	технологія зв'язування і вбудовування об'єктів в інші документи і об'єкти
OPC	стандартний інтерфейс доступу до даних з сторони ПЗ верхнього рівня
OPC UA	(Уніфікована архітектура OPC), остання за часом випуску специфікація яка надає крос-платформну сумісність.
SCADA	програмний пакет, призначений для розробки або забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт моніторингу або управління.
АБ	акумуляторна батарея
АСДУ	автоматизована система диспетчерського управління
АСУ	автоматизована система управління
АСУ ТП	автоматизована система управління технологічним процесом
ВЕС	вітрова електростанція
ВЕУ	вітрова електроустановка
ГА	генетичні алгоритми
ГЕС	гідроелектростанція
ГВССЕ	гібридна вітро-сонячна система електропостачання
ЕЕС	електроенергетична система

КДП	класичний метод динамічного програмування
ККД	коефіцієнт корисної дії
МДП	модифікація методу динамічного програмування
ОПР	особа, що приймає рішення
ПДЕ	поновлювані джерела енергії
ПЗ	програмне забезпечення
СППР	система підтримки прийняття рішень
ТДЕ	традиційні джерела енергії
ШНМ	штучна нейронна мережа

ВСТУП

Актуальність роботи.

Протягом останніх кількох років в Україні і світі відзначається різке зростання кількості електроенергії виробленою відновлюваними джерелами енергії. Що призводить не тільки до зменшення викиду вуглекислого газу в атмосферу і зменшення залежності від викопного палива, але і спричиняє складності з підтримкою стабільності роботи електричних мереж у зв'язку з нестабільністю генерації електроенергії відновлюваними джерелами.

Існує декілька підходів, що дозволяють дещо нівелювати цей недолік – це використання двох або більше різних джерел енергії. Або включення в систему акумулюючого елемента з метою використання його як резервне джерело електроенергії або для пом'якшення перехідних процесів при включенні/виключенні вітрових електричних установок або сонячних панелей. Такі системи наздаваються – гібридними системи енергопостачання. В процесі управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання (ГВССЕ) виникають нові наукові завдання, оскільки управління відбувається в умовах невизначеності декількох параметрів.

Перед сучасними автоматизованими системами диспетчерського управління енергодинамічними режимами ГВССЕ ставляться ряд задач: виробництво електроенергії відповідно до обмежень диспетчера мережі (або графіка навантаження); компенсація реактивної потужності; покриття пікового навантаження; ефективне використання обладнання і інші.

Теми, пов'язані з автоматизованих систем диспетчерського управління системи енергопостачання широко висвітлюються в роботах: Веніков В. А. (моделювання роботи систем енергозабезпечення, дослідження стійкості систем енергозабезпечення); Щур І. З. (обґрунтування параметрів гібридних систем енергопостачання, дослідження підходів управління акумулюючим елементом); Руденко Ю. М. (автоматизоване управління великими енергетичними системами).

Застосування існуючих методів для аналітичного розв'язання оптимізаційної задачі при управлінні ГВССЕ безпосередньо неможливо у зв'язку з такими особливостями структури системи як: наявність в структурі системи вітрових електричних установок різного типу; різний час напрацювання для установок; не лінійність процесу заряду-розряду акумулюючого елемента; особливості процесу перетворення сонячної енергії в електричну.

Тому, аналізуючи існуючі дослідження можна прийти до висновку, що для збільшення ефективності управління енергодинамічними режимами систем енергопостачання перспективним напрямком є розробка інформаційних технологій для системи підтримки прийняття рішень. Ця проблематика висвітлюється в роботах Філатова В. О. (розробка інформаційних систем, інтелектуальний аналіз даних), Поспелова Д. А. (методи управління складними системами), Білюка П. І. (розробка інформаційних систем підтримки прийняття рішень).

Таким чином, підвищення ефективності управління енергодинамічними режимами ГВССЕ за наявності акумулюючого елемента шляхом розроблення інформаційної технології для системи підтримки прийняття рішень є актуальним завданням.

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

Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” – методи, моделі та компоненти інформаційних управляючих систем і технологій. Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри автоматизованих систем управління Національного університету “Львівська політехніка” – методи, моделі та компоненти інформаційних управляючих систем і технології. Дисертація виконана в межах держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка»: “Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю

регіону”, номер держреєстрації №0117U004450 і “Експериментальна система нейромережевого криптографічного захисту та передачі даних у реальному часі з використанням баркероподібних кодів”, номер держреєстрації №0121U109503.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розроблення нових і вдосконалення існуючих методів, моделей та розвиток інформаційної технології динамічної підтримки вибору активного складу та ефективного управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання.

Об’єкт дослідження – процеси управління енергетичними режимами вітрової електростанції за наявності акумулюючого елемента з урахуванням вимог графіка навантажень та можливостей генерації енергії.

Предмет дослідження – методи та засоби інформаційної технології для системи підтримки прийняття рішень при управлінні енергетичними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання за наявності акумулюючого елемента.

Задачі дослідження. Досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачало розв’язання таких завдань:

1. Проведення аналізу інформаційних технологій управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії, формулювання вимог та визначення напрямів їх розвитку;
2. Розроблення моделі процесів перетворення сонячної енергії з врахуванням визначеного коефіцієнта прозорості атмосфери та просторових параметрів перетворювача;
3. Розроблення моделі динаміки процесів заряду-розряду акумулюючого елемента з врахуванням режиму роботи;
4. Удосконалення методу визначення активного складу вітрової електричної станції шляхом застосування розробленої моделі динаміки процесів заряду-розряду акумулюючого елемента;

5. Розроблення методу визначення активного складу вітрової електричної станції з використанням генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж;
6. Розроблення засобів інформаційної технології управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії;
7. Розроблення елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано: метод аналізу ієрархій (метод Сааті) – для визначення вагових коефіцієнтів вітроелектричних установок на основі матриці попарних переваг; метод інтегрального оцінювання системи – для визначення інтегральної оцінки ефективності вітроелектричної установки; метод динамічного програмування, модифікований метод динамічного програмування, теорія штучних нейронних мереж, генетичні алгоритми – для розв’язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі визначення активного складу; математичне та імітаційне моделювання для отримання статистичних даних та оцінки ефективності системи управління.

Наукова новизна одержаних результатів

У процесі розв’язання поставлених задач отримано такі наукові результати:

вперше:

- розроблено модель динаміки процесів заряду-розряду акумулюючого елемента, яка за рахунок врахування режимів роботи для заданого складу гібридної вітро-сонячної системи електропостачання забезпечує вибір параметрів акумулюючого елемента;
- розроблено модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією, яка завдяки врахуванню визначеного коефіцієнта прозорості та просторових параметрів перетворювача забезпечує

прогнозування обсягів генерування енергії та формування балансу потужностей;

– розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який за рахунок використання ансамблю генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж забезпечує підвищення швидкодії вибору та адаптацію активного складу до умов зовнішнього середовища;

набула подальшого розвитку:

– інформаційна технологія управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії, яка завдяки використанню розроблених моделей динаміки процесів заряду-розряду акумулюючого елемента, процесів перетворення сонячної енергії та методу визначення активного складу вітрової електричної станції забезпечує динамічну підтримку вибору активного складу та ефективне управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання;

Практичне значення одержаних результатів

Розроблена модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією з врахуванням встановленого коефіцієнта прозорості атмосфери та просторових параметрів перетворювача дозволяє оцінити кількість виробленої електроенергії сонячною станцією протягом заданого періоду часу на основі даних про інтенсивність сонячної радіації і метеопрогнозу. Наявність такої оцінки необхідна для продажу електроенергії через ринок «на добу наперед».

Розроблена модель процесів заряду-розряду акумулюючого елемента дозволила уточнена залежність між енергетичною ємністю акумулюючого елемента і небалансом потужності, що може бути використана для технічного обґрунтування номінальних параметрів акумулюючого елемента.

Розроблена модель визначення активного складу вітрової електричної станції з використанням генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж

дозволяє визначити оптимальний активних склад вітрової електричної станції з врахуванням вимог за параметрами часу розв'язку і розміром небалансу потужності. Розроблені методи використано про розробці елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: метод визначення активного складу вітрової електростанції за допомогою генетичних алгоритмів [1], модель процесів заряду-розряду акумулюючого елемента з врахуванням фізико-хімічних особливостей процесу і методу заряду CC/CV [2, 3], метод визначення активного складу вітрової електростанції за допомогою повнорекурентних нейронних мереж [4], проведення дослідження ефективності використання модифікованого методу динамічного програмування для розв'язання задачі визначення активного складу вітрової електричної станції [4, 5], метод визначення коефіцієнта прозорості атмосфери на основі даних про інтенсивність сонячної радіації [5], аналіз методів прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж [6], аналіз особливостей визначення активного складу вітрової електричної станції за допомогою динамічного програмування [7], аналіз методів роботи блоку управління акумуляторної батареї [8], правила управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання [9], метод оптимізації просторових параметрів сонячної станції [10], модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією з врахуванням встановленого коефіцієнта прозорості атмосфери та просторових параметрів перетворювача [10, 11].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та практичні розробки дисертаційної роботи доповідались та обґрунтовувалися на

конференціях:

- XII Міжнародна науково-технічна конференція «Комп’ютерні науки та інформаційні технології» (м. Львів, 2017);
- X Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2019);
- Комп’ютерні науки та інформаційні технології XIV Міжнародна науково-технічна конференція (м. Львів, 2019);
- VII Міжнародна науково-практична конференція «Фундаментальні та прикладні дослідження в сучасному світі» (м. Бостон, 2021);
- VIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції сучасних наукових досліджень» (м. Мюнхен, 2021).

Публікації. Основні результати дослідження опубліковано в 11 наукових публікаціях, з яких 5 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 5 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 169 сторінок, 69 рисунки, 11 таблиць, список літератури із 127 найменувань та 3 додатків.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ГІБРИДНИХ ВІТРО- СОНЯЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У розділі проведено аналіз сучасних підходів до управління енергодинамічними режимами гібридних вітро-сонячних систем електропостачання за наявності акумулюючого елемента. Визначено основні проблеми, які виникають в процесі управління гібридними системами енергопостачання, на основі яких сформовано перелік основних задачі дослідження.

1.1 Перспективи розвитку та особливості режимів роботи відновлювальних джерел енергії

Відповідно до закріпленому в «Енергетичній стратегії України» плану розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), Україна має збільшити частку ВДЕ в загальній структурі електроенергетики з 12,5% в 2020 до 35% до 2035 року.

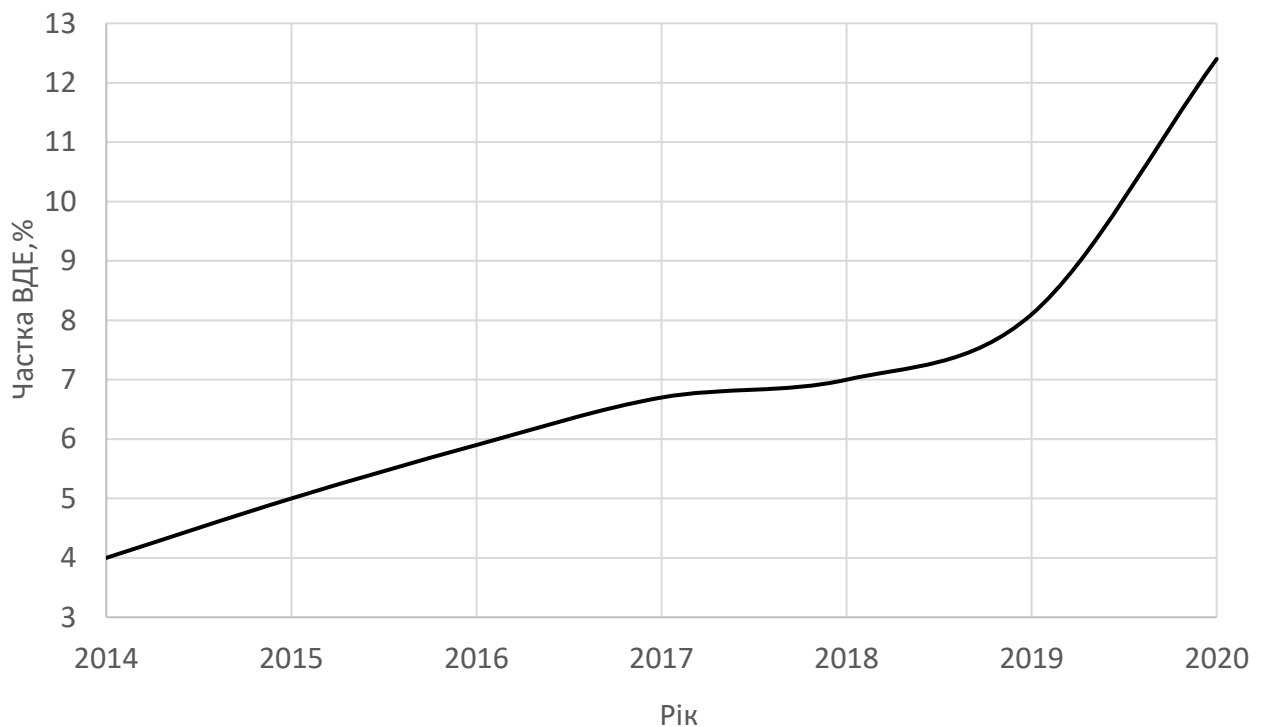


Рис. 1.1 Графік росту частки ВДЕ в загальній структурі електроенергетики України

Такий крок дозволить зменшити залежність нашої держави від імпорту енергоресурсів за рахунок використання значного природнього потенціалу ВДЕ. Сумарний потенціал всіх видів ВДЕ оцінюється в 43,0 млн. тон нафтового еквівалента (т.н.е.) в рік, або в 500 ТВт*год. Для порівняння, за 2018 рік Україна виробила 159,3 млрд КВт*год [12] електроенергії.

Відповідно до оцінок національного агентства з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів технічний потенціал ВДЕ на даний момент становить 15 ТВт*год. З потенціалом росту до 150 ТВт*год в 2030 році та 250 ТВт*год в 2050 році [13].

Відповідно до даних Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА) за 2018 рік всі вітрові електричні установки (ВЕУ) виробили 1,181 млрд КВт*год. У зв'язку з технічними особливостями ВЕУ, використання яких є економічно обґрунтованим тільки для регіонів, де середня швидкість вітру перевищує 5 м/с. Найбільш привабливими для будівництва вітряних електричних станцій (ВЕС) є зони Чорного і Азовського морів, деякі зони Карпат, південні області України.

Відповідно до атласу енергетичного потенціалу ВДЕ інституту відновлюваної енергетики НАН України раціональний економічний потенціал використання сонячних станцій в Україні становить $5,99 \cdot 10^5$ т.н.е. [14]. Наявний енергетичний потенціал дозволяє широко використовувати сонячні електричні станції (СЕС) практично в усіх областях України. Троте, найбільш перспективними напрямками для розвитку сонячної енергетики є південні регіони України. На півдні України термін ефективної роботи обладнання СЕС становить близько 7 місяців (квітень - жовтень), на півночі близько 5 місяців (травень - вересень).

Однією з особливостей роботи ВЕС та СЕС є імовірнісний характер генерації електроенергії. Величина генерованої потужності може змінюватися в значному діапазоні протягом доби. Що ускладнює забезпечення балансу активної і реактивної потужності в електроенергетичній системі (ЕЕС). Забезпечення балансу ЕЕС здійснюється за рахунок зміни робочої потужності

певної кількості джерел енергії у відповідності до зміни навантаження споживачів. Суттєве збільшення частки ВДЕ, може привести до збільшення регулюючого діапазону або швидкості реагування балансуєчих електростанцій, або до виникнення дефіциту електроенергії в період несприятливих погодних умов [15]. Проблеми забезпечення балансу ЕЕС при інтеграції значних потужностей ВДЕ досліджувалися в роботах [16, 17, 18, 19].

Один з способів, що дозволяє дещо нівелювати імовірнісний характер енергетичного потенціалу вітрових і сонячних станцій – це об'єднання їх в одну систему електропостачання.

Середня швидкість вітру на території України змінюється в 1,5-2 рази протягом року [20]. Взимку сила вітру значно більша, ніж влітку. Інтенсивність сонячної радіації для території України варіюються в 5-6 раз протягом цього ж періоду. Так, сумарна інтенсивність сонячної радіації протягом дня для літнього періоду складає 5-7 кВт*год/м², а для зимнього 0,8-1,2 кВт*год/м² [21]. Об'єднання ВЕС і СЕС в одну систему дає можливо підібрати такі потужності, які б дозволили підтримувати необхідний рівень виробництва електроенергії протягом року. В роботах [22, 23, 24, 25] розглядаються проблеми і задачі пов'язанні з гібридними системами електропостачання.

Для зменшення негативного впливу ВДЕ на роботу ЕЕС можуть вводитися обов'язкове прогнозування потужності ВЕС і СЕС «на добу наперед» [26, 27]. В Україні при продажу електроенергії через ринок, у випадку не дотримання прогнозованого графіка потужності більш ніж на 20% для ВЕС і на 10% для СЕС постачальник електроенергії змушений оплатити штраф, розмір його прямо пропорційний розміру небалансу потужності [28]. Прогнозування генерованої потужності ВЕС і СЕС дозволяє заздалегідь підготувати необхідний резерв потужності в ЕЕС для компенсації змін потужності ЕЕС. В роботі [24] показано, що використання прогнозування дозволяє значно зменшити обсяги невикористаної енергії чи втраченого навантаження в 1,5-2 рази, в залежності від частки СЕС в виробництві електроенергії та особливостей енергетичного

потенціалу регіону. Троте, навіть за умови високої точності прогнозу потужності вплив СЕС і ВЕС на систему електропостачання може бути значним.

Інший спосіб нівелювання негативного впливу СЕС і ВЕС – це введення стандартів, що зобов'язують ВЕС, СЕС або гібридні вітро-сонячні системи енергопостачання [29]: компенсувати реактивну потужності; виконувати контроль частоти і напруги в діапазоні, що залежить від номінальної потужності системи; підтримувати роботу системи, у разі виникнення аварійної ситуації протягом заданого періоду часу; обмежувати потужність системи відповідно до вказівок диспетчера мережі. Диспетчер мережі може накласти три види обмежень на потужності системи електропостачання [29]:

- Абсолютне обмеження генерації – обмеження активної потужності системи електропостачання до наперед визначеного ліміту потужності для захисту мережі від перевантажень;
- Дельта-обмеження генерації – резерв активної потужності електростанцій, що створюється для регулювання частоти та задається у відсотках від можливої генерації електростанцій;
- Обмеження градієнта потужності – обмеження максимальної швидкості зміни активної потужності системи електропостачання. Обмеження градієнта потужності використовується для підтримки балансів потужності.

З метою вирівнювання добового графіка навантажень і компенсації раптових змін корисного навантаження до складу системи електропостачання можуть включати накопичувачі електричної енергії. Перспективи інтеграції електрохімічних акумулюючих елементів з ВДЕ досліджено в [30, 31, 32]. Результати досліджень показують високу ефективність використання акумулюючих елементів для підтримки балансу активної енергії і частоти в ЕЕС. З метою визначення ефективності різних технологій акумулювання енергії проводилися дослідження [33, 32]. В яких літій-іонні акумулюючі елементи показали високу ефективність при компенсації перепадів потужності при

інтеграції енергосистем з ВДЕ і для підвищення стійкості ЕЕС.

Останні декілька років характерні значним збільшення сумарної потужності накопичувачів енергії. На 2018 рік сумарна ємністю накопичувачів енергії становить близько 8 ГВт*год [34]. Відповідно до прогнозів, сумарна ємність накопичувачів енергії зросте до 250 ГВт*год в 2030 році. На даний момент більше 85% з них становлять літій-іонні акумулюючі елементи. Україна також планує будівництво літій-іонних акумулюючих елементів, що відображено в «Енергетичній стратегії України до 2035 року» [35].

Широкому поширенню літій-іонних акумулюючих елементів сприяло зменшення в 7.5 раз їх вартості за останніх 10 років. В 2020 рік вартість 1 кВт*год літій-іонних акумулюючого елемента становить 137 доларів [36]. Динаміка ціна на літій-іонних батарей представлена на Рис. 1.2. Тим не менше, вартість акумулюючого елемента і витрати, пов'язані з його інтеграцією в систему електропостачання, досі є суттєвим недоліком використання електрохімічних акумулюючих елементів. До недоліків також можна віднести деградація акумулюючого елемента з часом і відсутність ефективних технологій утилізації акумулюючого елемента.

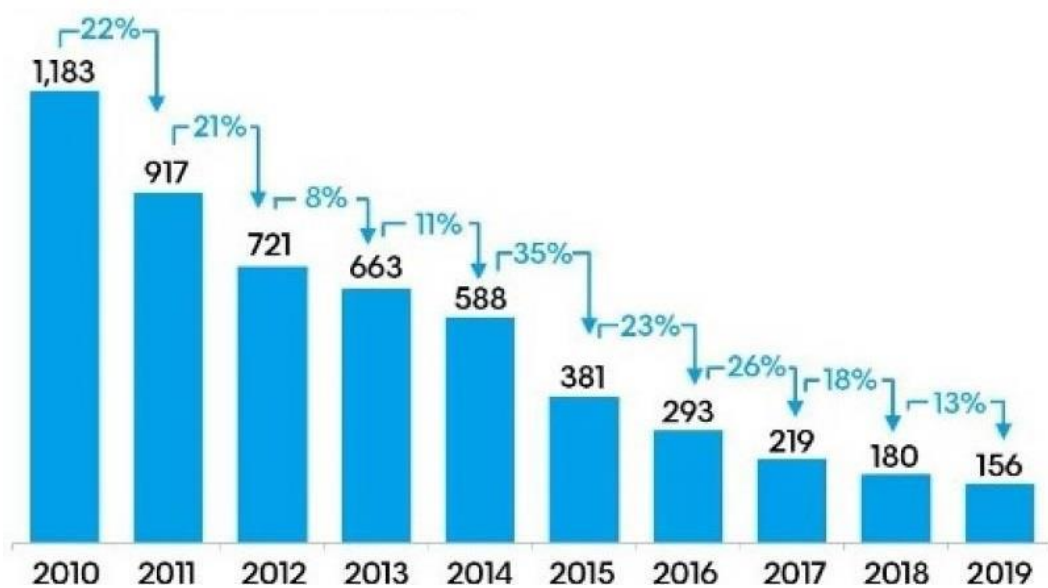


Рис. 1.2 Графік ціни на 1кВт*год літій-іонних батарей

1.2 Структура і функціональних можливості гібридних систем енергопостачання

Під комплексною системою електропостачання зазвичай розуміють систему, що використовує кілька джерел енергії. При цьому можливе використання комбінацій відновлювальних і традиційних джерел енергії, або виключно ВДЕ, що ускладнює можливості управління системою. З метою підвищення якості енергоживлення до складу гібридної системи можуть включати акумулюючий елемент (АЕ).

Елементи гібридної системи електропостачання можуть підключатися паралельно, послідовно, або паралельно-послідовно [37]. При послідовному підключенні акумулюючий елемент заряджаються від сонячних панелей, або вітрових електричних установок. Далі, за допомогою інвертора енергія з АЕ передається на шину змінного струму. Така гібридна система може працювати в ручному або автоматичному режимі за наявності необхідних сенсорів. Дана схема широко застосовується для «малих» гібридних системи, у зв'язку з своєю простотою [38]. Недоліком схеми є часті перезарядження АЕ, що негативно впливають на терміну служби, збільшення ємності АЕ для зменшення глибини розряду. Також, вузьким місцем є інвертор, вихід з ладу якого призводить до повного відключення системи від мережі.

При паралельному підключенні, подача енергії споживачу може здійснюватися незалежно кожним джерелом енергії, що входять в склад гібридної системи, або всіма разом при пікових навантаженнях. До переваг такої системи можна віднести більшу надійність енергозабезпечення, можливість підключити кілька різних видів поновлюваних джерел енергії. Проте, для ефективної роботи такої системи необхідна складна система управління.

По іншим признакам гібридні системи можна розділити на такі групи: автономні; сполучені з загальною енергосистемою; з АЕ, або без; з використанням лише ВДЕ, або з використанням традиційних джерел енергії [39] і інші. До мережевих систем електропостачання відносяться великі

електростанції, що можуть працювати як у складі регіональних, так і об'єднаних енергосистемах. В свою чергу невеликі систем електропостачання можуть бути частково або повністю автономними. Кожен з варіантів має свої недоліки і переваги.

Конфігурація гібридної системи електропостачання визначається виходячи з потреб користувача і можливостей управління режимами генерації. Обмеженням, в цьому плані, є управління ВЕС та СЕС, оскільки, їх режими генерації залежать від погодних умов.

Можна виділити три основні топології гібридних вітро-сонячних систем електропостачання: з підключенням через шину постійного струму; з підключенням через шину змінного струму; з підключенням через проміжну високочастотну шину постійного струму.

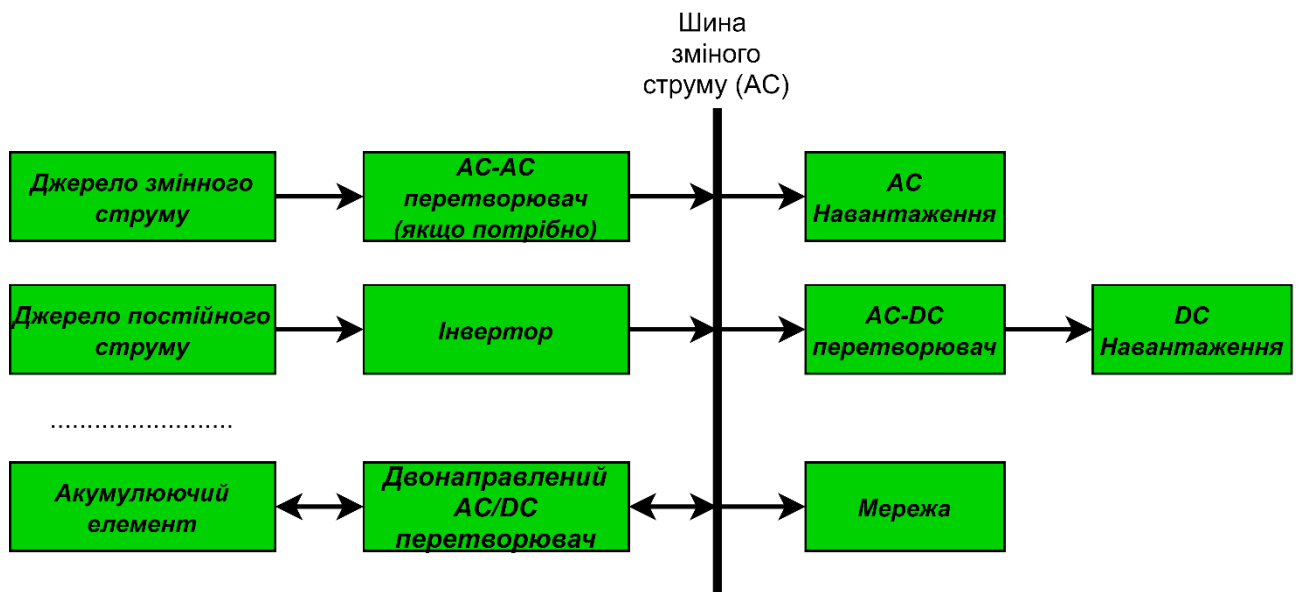


Рис. 1.3 Гібридна вітро-сонячна система електропостачання з підключенням через шину змінного струму

На Рис. 1.3 наведена топологія гібридної системи електропостачання з підключенням через шину змінного струму. Основна перевага цієї топології в простоті реалізації і легкості масштабування. Відсутність додаткових перетворювачів енергії забезпечує високий КПД системи. Троте, ця топологія вимагає наявності складних системи аеродинамічної стабілізації частоти

обертання ВЕУ і іншого обладнання для стабілізації і синхронізації значень напруги і частоти на виходах електричних генераторів і в мережі.

У зв'язку з значною вартістю і складністю такого роду систем, вони зазвичай встановлюють на «великих» ВЕУ. В свою чергу, більшість «малих» ВЕУ використовують без редукторну схему з електричними генераторами на постійних магнітах, що працюють на перемінній частоті обертання вітроколеса [40]. Така схема забезпечує високий КПД вітрової електричної установи при відносно низькій складності і вартості ВЕУ. Використання такого типу ВЕУ у складі гібридної системи з підключенням через шину змінного струму вимагає встановлення перетворювачів енергії для кожної установки.

Підключення до шини змінного струму сонячних панелей виконується через індивідуальний інвертор, а підключення акумулюючого елемента, що зазвичай виконується на базі акумуляторної батареї, через двонаправлений перетворювач постійного струму в змінний струм.

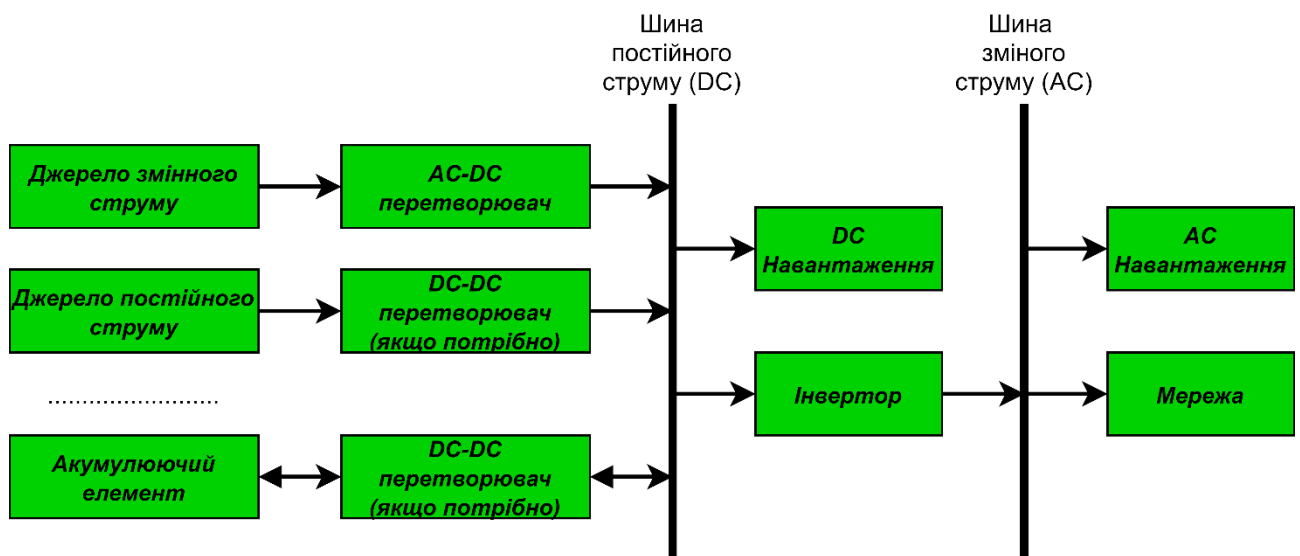


Рис. 1.4 Гібридна вітро-сонячна система електропостачання з підключенням через проміжну шину постійного струму

Інша схема підключення елементів гібридної системи представлена на Рис. 1.4. Схема підключення через проміжну шину постійного струму дозволяє нівелювати деякі недоліки попередньої, незважаючи на складнішу структуру. Основна перевага наведеної схеми це відсутність необхідності в синхронізації

режимів роботи ВЕУ, СЕС між собою, що дозволяє управляти цими агрегатами виходячи з критеріїв оптимальності. Також, до переваг такої схеми можна віднести: легкість масштабування; легкість вирішення проблеми з сумісністю обладнання; високу якість генерованої електричної енергії, у зв'язку з підключенням користувачів через смільний автономний інвертор; значно спрощується схема підключення сонячних панелей і акумулюючого елемента; ВЕУ з зміною частотою обертання можуть бути підключені через керований АС-DC перетворювач. В свою чергу, втрати енергії пов'язані з подвійним перетворенням енергії АС-DC перетворювачами і інверторами є незначними [40]. Така схема гібридної системи електропостачання характерна для малих і середніх систем (1 - 100 кВт).

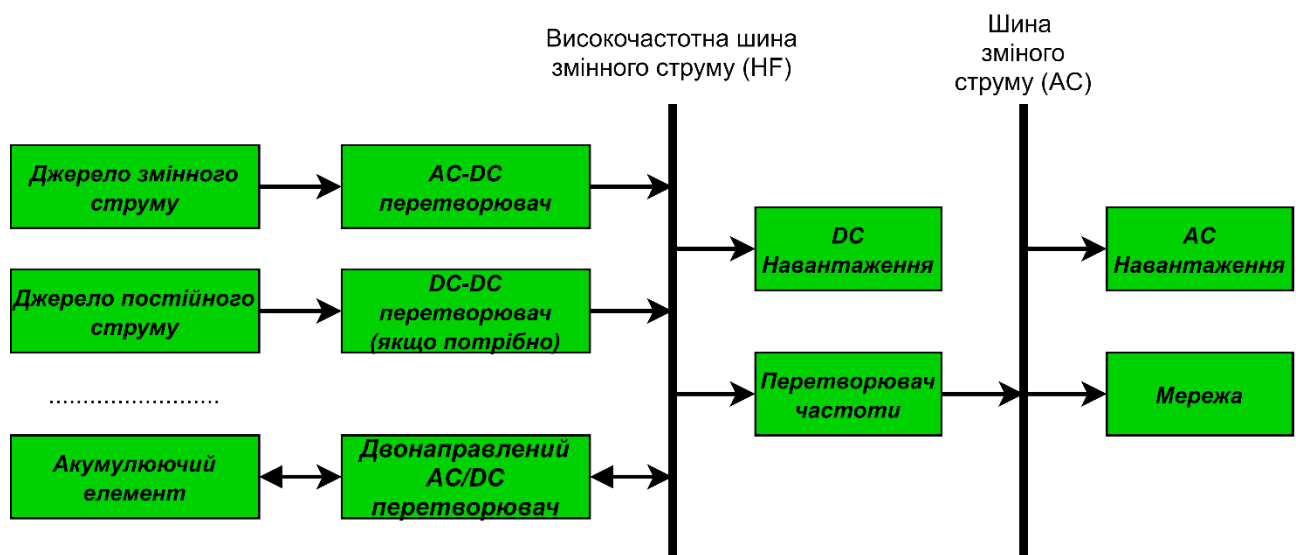


Рис. 1.5 Гібридна вітро-сонячна система електропостачання з підключенням через проміжну високочастотну шину постійного струму

На Рис. 1.5 наведена схема підключення елементів гібридної системи через проміжну високочастотну шину постійного струму. Такий спосіб підключення описаний в роботах [41, 42, 43]. Подібна схема підключення широко застосовується в електричних мережах літаків і космічних апаратів, з метою мінімізації кількості реактивних елементів в системі і як результат зменшення вартості системи. Проте, у зв'язку з значними відстанями між елементами гібридної системи електропостачання застосування такої схеми має ряд

недоліків пов'язаних з значними втратами енергії при її передачі на значні відстані.

Аналіз вище описані схеми організації гібридної системи електропостачання показав, що найбільш перспективним є схема з використанням проміжної шини постійного струму [40]. Така схема дозволяє легко масштабувати систему, модернізувати її елементи. Використання проміжної шини постійного струму значно спрощує процес управління енергодинамічними режимами роботи гібридної системи.

1.3 Аналіз методів моделювання режимів роботи акумулюючого елемента

Акумулюючий елемент (АЕ) – це система зберігання енергії в довільній формі. В залежності від форми зберігання енергії можна поділити АЕ на такі типи:

Гідроакумулятори. Одна з перших технології для зберігання великого об'єму енергії. Ідея полягає, перекачці води з одного резервуара в інший, що знаходиться на підвищенні. Такий підхід забезпечує високу маневреність системи, оскільки, напір води можна регулювати механічно, зменшуючи або збільшуючи ширину шлюзу. Недоліком є залежність ємності і собівартості гідроакумулятора від особливостей рельєфу.

Зберігання енергії за допомогою стисненого повітря. Надлишкова електроенергія використовується для нагнітання повітря під тиском в резервуар. До переваг такого підходу можна віднести: меншу ціну порівняно з електрохімічними накопичувачами енергії; відсутність необхідності в рідкоземельних мінералах; можливість переобладнання старих газових сховищ або шахт. До недоліків: не високий ККД, що не перевищує 80%; система займає значну площу; часто використовується природній газ для підігріву вихідного потоку повітря при розряді.

Криогенні накопичувачі енергії. Основна відмінність від накопичувачів

попереднього типу, в тому що під час стискання повітря енергія, що виділяється, зберігається в спеціальному тепло-акумулятор. І використовується при розряді накопичувача для підігріву вихідного потоку повітря. Такий підхід дозволяє підвищити ККД системи накопичення енергії. Одна з проблем накопичувачів такого роду в тому, що в ККД залежить від швидкості охолодження тепло-акумулятора.

Електрохімічні накопичувачі енергії. Велика група накопичувачів, що об'єднує в собі свинцево-кислотні, нікелево-кадмієві, літій-іонні акумулятори і акумулятори інших типів. Протягом останніх декількох років, особливо активно розвивалися літій-іонні акумулятори. Вони завоювали 85% ринку промислових систем накопичення енергії [34]. Превагою літій-іонні акумуляторів над іншими електрохімічними акумуляторами є відсутність ефекту пам'яті, висока енергоємність, глибокі цикли заряду-розряду (до 70-80%), більша потужність одиничного елемента. До недоліків можна віднести залежність ресурсу акумулятора від режимів і температури експлуатації.

Суперконденсатори. Суперконденсатор - конденсатор з органічним або неорганічним електролітом, «обкладками» в якому служить подвійний електричний шар на межі розділу електрода і електроліта [44]. Суперконденсатори мають значно меншу енергоємність (одиниці Вт*год/кг), але більшу питому потужність (2-10 кВт/кг) порівняно з електрохімічними накопичувачами. Також, до переваг можна віднести відсутність обмежень на глибину розряду. У зв'язку з описаними особливостями, перспективним напрямком є поєднання суперконденсаторів і акумуляторів, що дозволяє збільшити ресурс акумулятора і знизити час відгуку системи на зовнішні впливи.

Кінетичні накопичувачі (маховики) енергії. Принцип дії маховиків базується на перетворенні кінетичної енергії в електричну і навпаки. При заряді кінетичного накопичувача відбувається розкрутка масивного колеса до значних швидкостей. Такого роду накопичувачі можуть бути заряджені/розряджені за відносно короткий період часу, що дозволяє працювати в діапазоні більш

високих потужностей при менших затратах. До недоліків маховиків можна віднести саморозряд в результаті тертя.

В даній роботі розглядається система накопичення енергії, або акумулюючий елемент (АЕ), що складається з літій-іонні акумуляторів.

Існує декілька підходів до моделювання АЕ на основі літій-іонних акумуляторів. В загальному, їх можна розділити на три основні категорії [45]:

- електрохімічні моделі – базуються на моделюванні хімічних реакцій, що відбуваються в АЕ. Мають високу точність, але вимагають великої кількості обчислень;
- еквівалентні схеми – мають меншу точність, вимагають менших обчислювальних зусиль, ніж електрохімічні моделі. Акумулятор подають як електричну коло із джерелом напруги або конденсатором та низкою опорів. Моделі такого типу широко використовуються в системах управління акумуляторами;
- емпіричні моделі – вимагають меншої кількості обчислювальних зусиль та показують задовільну точність прогнозування поведінки акумулятора.

У зв'язку з складністю процесів моделювання АЕ, інколи автори максимально спрощують модель [46]. В такому випадку можуть бути відсутні обмеження на кількість енергії, яку може прийняти-віддати акумулятор, швидкість заряду-розряду та інше, а АЕ характеризується тільки поточною і максимальною ємністю. Відсутність обмежень, що викликані фізико-хімічними характеристиками, а також іншими особливостями енергодинамічних процесів, зумовлюють низьку коректність моделі, що зменшує якість та обмежує область застосування отриманих наукових та практичних результатів.

Окремі результати дослідження, щодо ефектів використання АЕ в складі ВЕС, описано в [47, 48]. У наведених роботах основна увага зосереджена на економічних параметрах – збільшення прибутку, який можна отримати використовуючи АЕ в складі ВЕС. Крім того, значна частина розроблених моделей не є універсальними, їх можна використати для моделювання АЕ

конкретної конфігурації [47, 49]. Також, до недоліків відомих моделей можна віднести необхідність використання великої кількості параметрів електрохімічних процесів. Наприклад, для використання моделі поданої у статті [47] необхідно мати залежність між напругою та SOC (State of Charge – рівень заряду акумулятора в відсотках), внутрішній опір акумулятора, інші. На практиці, необхідну залежність складно отримати, що значно ускладнює використання описаної моделі. Модель, яка представлена в статті [49] ґрунтується на конкретній конфігурації АЕ, що ускладнює її використання для моделювання іншої структури.

Також, автори часто зосереджуються на стратегії управління акумуляторною батареєю. В таких моделях АЕ не враховуються (або частково враховуються) фізико-хімічні особливості, такі як: саморозряд, специфіка розряду-заряду тощо. У статті [50] коефіцієнт ефективності заряду-розряду є постійним і дорівнює 1. Крім того, немає обмежень щодо максимального розряду-заряду.

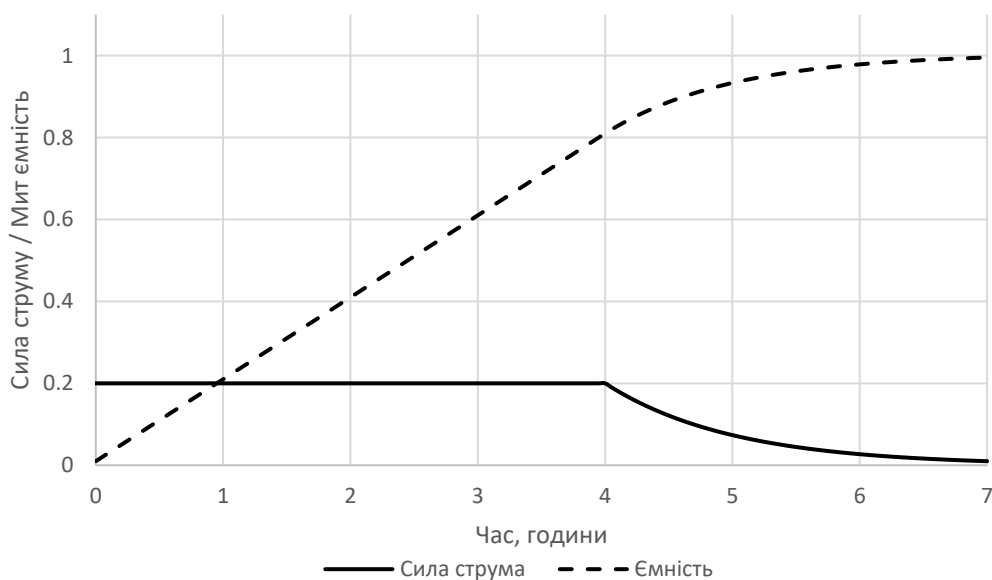


Рис. 1.6 Схематичне зображення роботи методу заряду CC/CV

В той час, як більшість виробників літєвих та літій-іонних електрохімічних акумуляторів [51], рекомендують проводити заряд за складним графіком, згідно якого спочатку заряджають акумулятор при постійному струмі

0,2 - 3С (величина струму заряду залежить від типу, моделі батареї і ряду інших факторів) до досягнення заданого значення напруги, при цьому отримується 70 - 80% необхідної ємності. Після цього заряд відбувається в режимі постійної напруги, а сила струму зменшується в залежності від рівня заряду АЕ. Такий режим заряду називається заряд постійним струму – постійною напругою (CC/CV).

1.4 Методи і засоби контролю та управління гібридними вітро-сонячними системи електропостачання

Перед блоком управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання стоять задачі, що притаманні класичним ВЕУ і СЕС, а також ряд нових задач, що пов'язані з визначенням пріоритету використання енергії, ефективним використанням електричного обладнання, а також з генерація електроенергії відповідно до графіка навантаження з врахуванням особливостей кожного з відновлювальних джерел енергії.

Визначення пріоритету генерації електроенергії одним з джерел складна техніко-економічна задача. При її розв'язанні необхідно враховувати не тільки собівартість виробництва електроенергії, але й зношення елементів системи у зв'язку з зміною енергодинамічних режимів. Оскільки, процес включення або виключення ВЕУ призводить до зношення деяких елементів і агрегатів ВЕУ.

1.4.1 Методи обґрунтування активного складу вітрових електричних станцій

Одна з задач, яка виникає під час управління вітровою електричною станцією (ВЕС) відповідно до графіка навантаження – це задача знаходження активного складу вітрових електричних установок (ВЕУ). Суть задачі полягає в знаходженні такого набору ВЕУ, що дозволить дотримуватися графіка навантаження з врахуванням ефективність ВЕУ.

У зв'язку з нерівномірністю графіка навантаження і непостійністю швидкості вітру, можливі ситуації, коли необхідно увімкнути або вимкнути одну або кілька ВЕУ з метою зменшення відхилення між графіком навантаження і потужністю генерації. Існують три основні причини, що призводять до визначення нового активного складу ВЕС:

- Зміна швидкості вітру. У зв'язку, з кубічною залежністю між швидкістю вітру і кінетичною енергією вітрового потоку, невелика зміна швидкості вітру може призвести до значної зміни потужності ВЕУ;
- Зміна навантаження споживачів;
- Планові огляди, ремонтні роботи агрегатів і елементів ВЕУ, тощо. В такому випадку, визначення нового активного складу необхідно з метою компенсації потужності зупинених ВЕУ.

Існує декілька підходів до формалізації задачі визначення активного складу ВЕС. Один з них, це формалізації цієї задачі як задачі пакування рюкзака. В такому випадку, під максимальною вагою рюкзака розуміємо потужність, яку необхідно згенерувати, а під ціною – ефективність кожної ВЕУ. Тобто, для знаходження активного складу ВЕС необхідно знайти такий набір ВЕУ, щоб сумарна потужність ВЕУ набору була менша або рівна ніж потужність, яку треба згенерувати, а сума коефіцієнтів ефективності ВЕУ – максимальною.

Коефіцієнт ефективності ВЕУ – це інтегральна величина, що обчислюється на основі технічних параметрів ВЕУ, таких як: показники технічного стану, кількість включень/виключень, кількість виробленої енергії, кількість напрацьованих годин, тощо. Для визначення коефіцієнт ефективності ВЕУ використовується адитивна функція:

$$K_{\Sigma} = a_1 K_1 + \dots + a_j K_j \quad (1.1)$$

де a_j – ваговий коефіцієнт j -го параметра, K_j – нормалізоване значення j -го параметра. Оскільки описані параметри мають різну розмірність, кожен з них нормалізується таким чином щоб, значення лежало в межах $[0;1]$.

Формалізація задачі визначення активного складу ВЕС, як класичну задачу

пакування рюкзака, має деякі недоліки: сумарна потужність активного складу ВЕС має бути меншою або рівною ніж потужність, яку треба згенерувати; найбільш пріоритетними, для включення до активного складу, є ВЕУ з максимальним відношенням між ефективністю і потужністю, що призводить до значно частішого використання ВЕУ меншої потужності (за наявності таких).

Задачу визначення активного складу, що формалізована як задача пакування рюкзака, можна розв'язати за допомогою ряду методів: методу повного перебору, методу гілок та границь, методу динамічного програмування, модифікації методу динамічного програмування і інших. Розглянемо ці методи детальніше.

Метод повного перебору

Метод повного перебору, або метод «грубої сили» – це метод знаходження оптимального рішення задачу шляхом перебору всіх можливих варіантів. Основний недолік цього методу це велика обчислювальна складність. При цьому, навіть у випадку коли цільова функція може бути обчислена за поліноміальний час, повний перебір всіх можливих рішень може потребувати експоненціального часу роботи [52].

Метод повного перебору може бути використаний для розв'язання задачі визначення активного складу, що формалізована як задача пакування рюкзака. Припустимо, що існує N предметів, які можна укласти в рюкзак. Тоді, необхідно визначити такий набір предметів, щоб сумарна їхня вага була меншою ніж максимально допустима, а вартість максимальна [53]. Кожен предмет можна покласти в рюкзак, або ні. В такому разі, складність методу повного перебору складатиме $O(2^n)$ [54].

Використання методу повного перебору для розв'язання задачі визначення активного складу ВЕС ускладнене з високою обчислювальною складністю даного методу. На Рис. 1.7 наведена залежність між швидкістю знаходження активного складу методом повного перебору і числом ВЕУ.

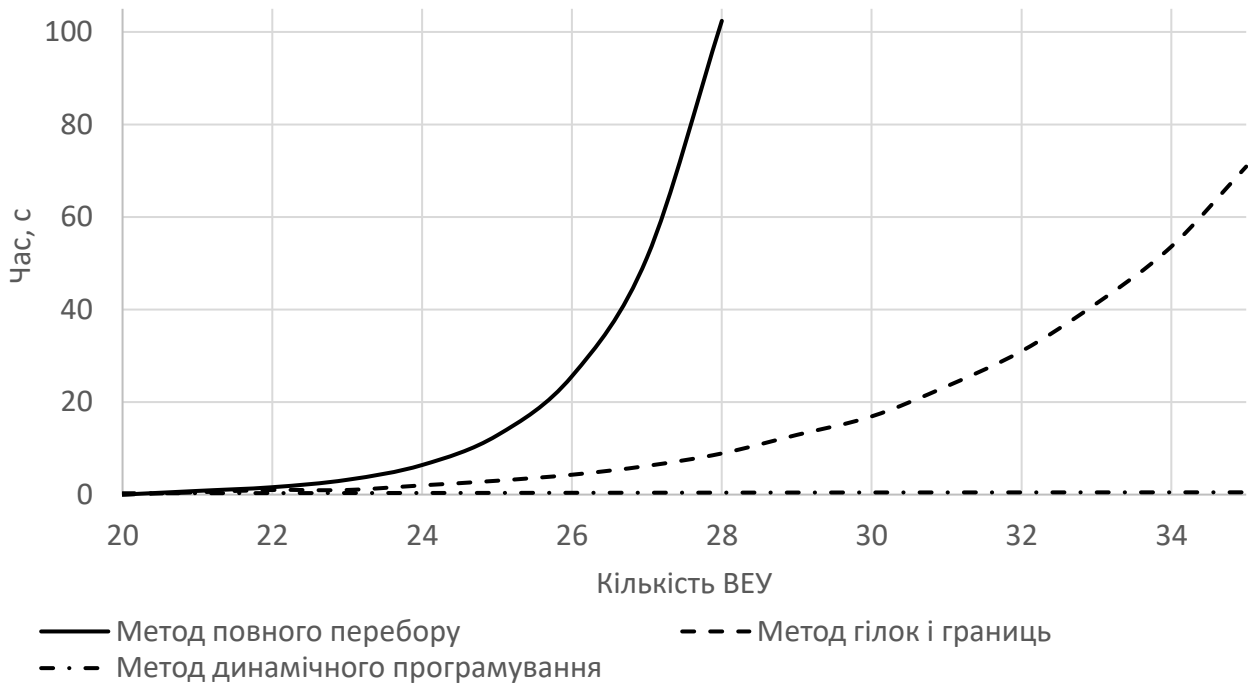


Рис. 1.7 Залежність між швидкістю знаходження активного складу і числом ВЕУ

Метод гілок та меж

Метод гілок і меж – це одна з варіацій методу повного перебору, обидва методи відносяться до точних алгоритмів. Різниця між цими методами в тому, що метод гілок і меж не перевіряє завідомо неоптимальні рішення.

Іншими словами ідея методу в тому, щоб під час побудови дерева рішень оцінювати верхню межу цінності рішення для кожного вузла і будувати гілки дерева тільки для вузла, що мають максимальну оцінку [55]. Метод закінчує свою роботу коли максимальна верхня межа знаходиться в листі дерева.

Швидкодія даного методу залежить від особливостей предметної області і способу визначення оцінок. Троте, вона не може бути гіршою ніж швидкодія методу повного перебору ($O(2^n)$). На Рис. 1.7 наведена залежність між швидкістю знаходження активного складу методом гілок і меж і числом ВЕУ.

Пропри те, що швидкодія даного методу краща ніж для методу повного перебору, знаходження активного складу ВЕС для великої кількості ВЕУ вимагає значно більшої кількості обчислень підрівняно з деякими іншими методами [56,

57].

Метод динамічного програмування

Метод динамічного програмування базується на принципі оптимальності Беллмана, що можна сформулювати так: оптимальна стратегія володіє такими якостями, що, який би не був початковий стан або початкове рішення, наступні рішення повинні прийматися, виходячи із оптимальної стратегії відносно стану, що отримується в результаті першого рішення [58]. Іншими словами, для знаходження оптимального рішення на останньому кроці необхідно знайти оптимальні рішення на всіх попередніх кроках.

Суттєвою перевагою використання методу динамічного програмування для розв'язання задачі знаходження активного складу ВЕС є те, що його швидкодню складає $O(N \cdot W)$ [59], де N – кількість ВЕУ, W – необхідна потужність. Для досягнення такої швидкодії необхідно використати оптимізаційну методику «memoізація». На Рис. 1.7 наведена залежність між швидкістю знаходження активного складу методом динамічного програмування і числом ВЕУ. До недоліків методу можна віднести необхідність в значній кількості пам'яті для зберігання проміжних результатів роботи методу і необхідність дискретизувати ваги елементів з певною частотою, що може призводити до накопичення похибок в процесі знаходження розв'язку.

Використання методу динамічного програмування для знаходження активного складу ВЕС досліджувалося в роботах [57, 60, 61].

Модифікація динамічного програмування

Як було раніше сказано, постановка задачі визначення активного складу як задачу пакування рюкзака має ряд недоліків. Для їх усунення в роботі [7] запропонована інша формалізація задачі знаходження активного складу, а також модифікований метод динамічного програмування (МДП), що дозволяє розв'язати поставлену задачу.

Головна ідея роботи полягає в зміні обмежень і цільової функції таким чином, щоб мінімізувати відхилення і максимізувати ефективність ВЕС. Цільова

функція має вигляд:

$$\Delta P = \left[\sum_{n=1}^N b_n p_n - P \right] \quad (1.2)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{n=1}^N b_n k_{\Sigma n}}{\sum_{n=1}^N b_n} \quad (1.3)$$

$$W(\Delta P, \bar{K}) = a_1 \bar{K} + a_2 (1 - \Delta P) \rightarrow \max \quad (1.4)$$

де b_n – бінарна величина, яка показує включений n -й ВЕУ у набір ($b_n = 1$), чи ні ($b_n = 0$), p_n – потужність n -ї ВЕУ, k_n – коефіцієнт ефективності n -ї ВЕУ, P – потужність, яку необхідно згенерувати, ΔP – різниця між навантаженням, яке необхідно забезпечити, та потужністю активного складу ВЕС, \bar{K} – коефіцієнт ефективності набору ВЕУ.

В класичному методі динамічного програмування значення для знаходження оптимального розв'язку під-задачі $S(i, p)$, де i – кількість ВЕУ, p – необхідна потужність, порівнюються дві альтернативи $S(i - 1, p)$ і $S(i - 1, p - p_i) + w_i$, де p_i – потужність i -ї ВЕУ, w_i – коефіцієнт ефективності i -ї ВЕУ. В модифікованому методі динамічного програмування порівнюються три альтернативи $S(i - 1, p)$, $S(i - 1, [p - p_i]) + \sum w$ і $S(i - 1, [p - p_i]) + \sum w$. Серед них вибирається альтернатива з максимальним значенням цільової функції (вираз 1.4).

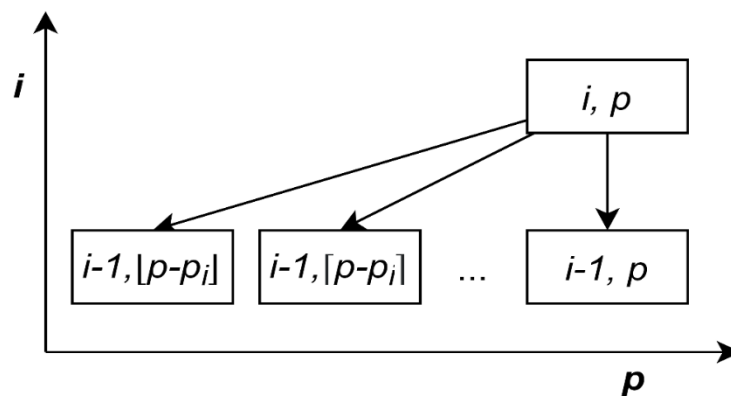


Рис. 1.8 Схема вибору альтернативи модифікованим методом динамічного програмування

На основі аналізу публікацій можна стверджувати, що модифікований метод динамічного програмування показує одні з найкращих результатів при розв'язанні задачі визначення активного складу ВЕС.

Генетичні алгоритми

Для розв'язання задач комбінаторної оптимізації, до цього класу відноситься і задача визначення активного складу ВЕУ, можна використати генетичні алгоритми [62]. На відміну від інших вище згаданих методів, генетичні алгоритми – це не детермінований метод, тобто вони не гарантують знаходження оптимального рішення за поліноміальний час, але в деяких випадках дозволяють знайти рішення швидше ніж за допомогою інших відомі детерміновані методів [63].

Аналіз дослідження щодо застосування генетичних алгоритмі показав [64, 65, 66], що класичні генетичних алгоритмів є ефективним методом розв'язанням комбінаторних задач. Проте, застосування генетичних алгоритмі ускладнюється відсутністю аналітичного способу визначення оптимальної конфігурації (методу селекції, оператора схрещення, оператора мутації, розміру популяції, тощо). Результати роботи методу можуть сильно варіюються в залежності від конфігурації і особливостей поставленої задачі. Тому, для визначення ефективності генетичних алгоритмі при розв'язанні задачі знаходження активного складу ВЕС потрібно провести додаткових досліджень.

Штучні нейронні мережі

Штучні нейронні мережі застосовуються для розв'язання задач в таких сферах, як: класифікація і кластеризація; оптимізація; при управлінні складаними системами; екстраполяція та прогнозування. Перспективи використання штучних нейронних мереж, для розв'язання оптимізаційних задач описані в роботах [67, 68]. На основі аналізу представлених результатів можна стверджувати, що використання сучасних методів машинного навчання (зокрема штучних нейронних мереж) має значні перспективи для розв'язання задача комбінаторної оптимізації, зокрема і для розв'язання задачі пакування рюкзака.

Одним з перспективних напрямків досліджень є використання нейронних мереж Хопфілда [69]. Суттєва перевага мереж Хопфілда в тому, що нейрони в цій мережі можуть перебувати тільки у двох станах 0 або 1, що усуває необхідність перетворення вихідних даних в дискретні значення. Проте, як показано в роботі [68], мережа Хопфілда може працювати нестабільно для деяких вхідних даних.

До недоліків штучних нейронних можна віднести: необхідність в визначенні типу мережі і її конфігурації, яка б найкраще розв'язувала поставлену задачу; навчання мережі на вибірці тестових даних. Для визначення ефективності різних конфігурацій штучних нейронних мереж при розв'язанні задачі знаходження активного складу ВЕС потрібно провести додаткових досліджень.

1.4.2 Управління сонячними електричними станціями

Задачі, що ставляться перед блоком управління сонячної електричною станцією (СЕС), залежать від типу стації. В загальному сонячні станції можна поділити на три типи: мережеві, автономні і гібридні.

Основна задача мережевих СЕС – це продаж електроенергії. Вся згенерована електроенергії постачаються в загальну мережу тому такі станції майже ніколи не включають акумулюючий елемент. Тим не менше, в деяких країнах вихідна потужність СЕС може бути обмежена диспетчером, або існують вимоги, щодо дотримання графіка навантаження. Обмеження вихідної потужності здійснюється за допомогою засобів моніторингу і управління СЕС.

На відміну від мережевих СЕС, основна задача автономних СЕС – це безперебійне енергозабезпечення домогосподарства або підприємства. Обов'язковим елементом такої системи є акумулюючий елемент, або інше джерело енергії (наприклад, дизель генератора). Станції такого типу можна поділити на два під-типи: резервні, повністю автономні. Резервні СЕС підключенні до мережі. Що дозволяє, у випадку повністю розрядженого акумулюючого елемента, використовувати енергії з мережі. Повністю

автономні, як слідує з назви, не мають підключення до мережі. Станції такого типу, зазвичай, встановлюються в віддалених регіонах, де відсутнє електропостачання.

Гібридні системи – станції такого роду передбачають використання енергії з кількох джерел відновлюваної енергії. Що дозволяє збільшити стабільність енергопостачання. Такого роду системи поєднують в собі особливості резервних і мережевих СЕС. У випадку наявності надлишку енергії, гібридна система в першу чергу заряджає акумулюючий елемент, а при досягненні необхідного рівня заряду, надлишок енергії буде направлений в мережу. У зв'язку з наявністю кількох різних джерел енергії виникає задача визначення пріоритету джерела або обмеження генерації одного з джерел, у випадку наявності надлишкової енергії.

Управління будь-яким з вище описаним типом СЕС здійснюється за допомогою сучасних інверторів. Головна задача інвертора – це перетворення постійного струму з сонячних панелей в змінний струм. До одного інвертора підключать набір сонячних панелей, таким чином, щоб їхня максимальна потужність не перевищувала потужності інвертора. Схема мережевої СЕС представлена на Рис. 1.9.

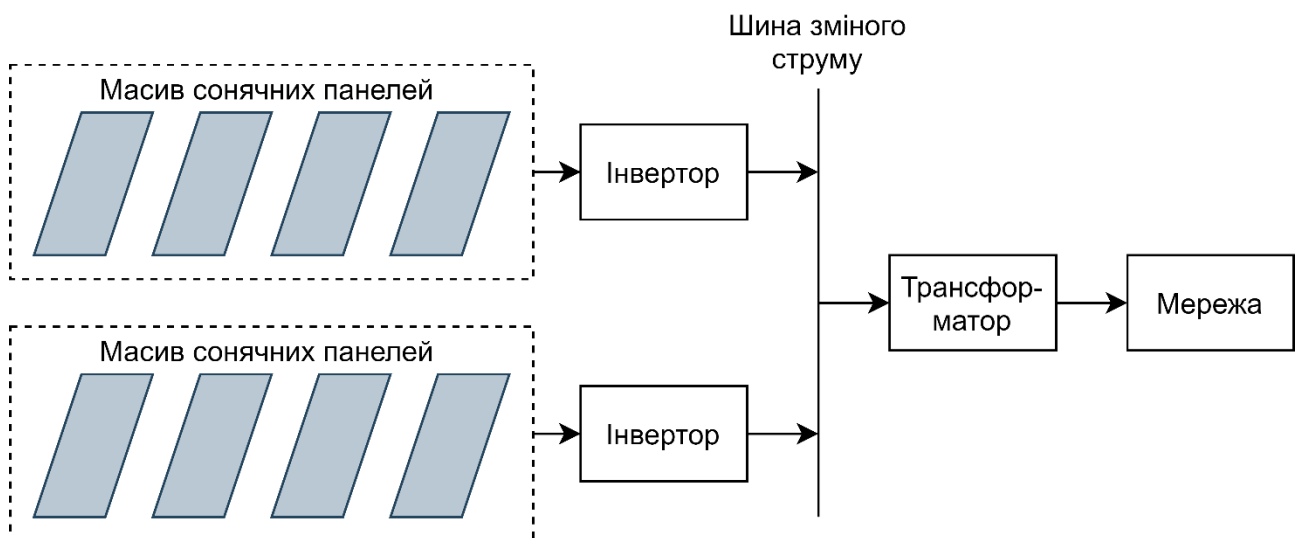


Рис. 1.9 Схема мережевої сонячної електричної станції

В залежності від поставлених задач, інвертори поділяються на три типи: мережеві, автономні, гібридні інвертори. Найбільш функціональними можна вважати гібридні інвертори, оскільки вони здатні виконувати функції мережевих,

автономних інверторів. В свою чергу вони можуть бути поділені на три групи.

Гібридні інвертори, що працює за принципом джерела безперебійного живлення. У випадку наявності мережі, інвертор такого типу живить споживача від мережі і заряджає акумулюючий елемент (як від мережі, так і від СП). У випадку відсутності мережі, інвертор живить споживача від АЕ і від СП.

Модифікацією інвертора першої групи є гібридний інвертор з функцією вибору пріоритету AC/DC. У режимі AC інвертор такого типу працює як інвертор попереднього типу. У режимі DC інвертор максимально використовує енергію СП, або інших альтернативних джерел. Енергія від СП використовується для живлення навантаження і заряду АЕ.

Гібридними інверторами є інвертора з функцією «підмішування», або line-interactive інвертор. Інвертор такого типу дозволяє максимально використати енергію СП. Інвертор може брати максимум енергії від СП, а при нехватці енергії добирати з мережу. Також, реалізована функція «підтримки мережі», тобто використання енергії з АЕ коли потужності мережі не вистачає.

Управління сучасних інверторів можна виконати через локальну мережу або через мережу Інтернет. Інвертори можна обладнати спеціальними пристроями які будуть передав дані про роботу через один із каналів даних (Wi-Fi, LAN, GPRS) на локальний комп'ютер. У випадку отримання доступу через мережу Інтернет, інвертори надсилають дані на сервера компанії виробника і за допомогою веб-браузера власник може отримати доступ до статистичних даних роботи інвертора і до функцій управління.

Інвертори мають широкий спектр можливостей щодо обмеженні потужності генерації СП. Оператор може дистанційно відключити один або декілька інверторів, має можливість обмежити генерацію енергії в абсолютних або відносних одиницях, регулювати параметри змінного струму в деякому діапазоні. Наявність таких можливостей дозволяє регулювати потужність генерації СЕС в широкому діапазоні значень.

1.5 Прогнозування потужності відновлювальних джерел енергії

Зростання частки ВДЕ (сонячних і вітрових електричних станцій) в генерації електроенергії призводить до збільшення небалансу потужностей. Для компенсації якого необхідно вводити нові резервні високо маневрені джерела електроенергії або акумулюючі елементи, які б дозволили компенсувати нехватку електроенергії в період пікових навантажень.

Один з способів зменшити потребу в резервних джерела електроенергії і акумулюючі елементи при зростанні частки ВДЕ є короткострокове прогнозування вітрового та сонячного потенціалів, а отже і потужності ВЕС і СЕС. Прогноз – це обґрунтована ймовірнісна оцінка стану об'єкту або значення величини, що характеризує об'єкт або процес, через певний проміжок часу [70]. Під короткостроковим прогнозуванням звичайно розуміють погодинні, або півгодинні прогнози, що виконуються на 1-2 дня наперед [37].

Якість короткострокових прогнозів можна оцінювати за такими параметрами, як точності, стабільності та обґрунтованості результатів. Під точністю мається на увазі середнє відхилення між прогнозованими і фактичними значеннями. Зазвичай для його оцінки використовують такі показники, як: середнє відхилення; середньоквадратичне відхилення; середньоквадратична похибка; максимальна похибка; і інші. Найпоширенішим методом для оцінки стабільності прогнозу є побудова емпіричної функції розподілу похибок. Часто використовують такі показники, як: математичне очікування похибки; максимальна похибка; середньоквадратичне відхилення похибки. Для визначення обґрунтованість прогнозу оцінюється відношення кількості екстремальних похибок до їх загальної кількості. Екстремальними похибками називають похибки, що виходять за довірчий інтервал або не відповідають вимогам точності прогнозу.

Вимоги щодо прогнозування потужності СЕС і ВЕУ описані в законі України «Про ринок електричної енергії» від 2017 року [28]. Закон вимагає

надавати погодинний прогноз «на добу наперед» потужності СЕС і ВЕС, а також вводить фінансову відповідальність за його не виконання. Відшкодування відбувається у випадку відхилення від затвердженого прогнозу більше ніж на 10% для СЕС і на 20% для ВЕС. Частка відшкодування гарантованому покупцю вартості врегулювання небалансу становить:

- до 31 грудня 2020 року - 0 відсотків;
- з 1 січня 2021 року - 10 відсотків;
- з 1 січня 2022 року - 20 відсотків;
- з 1 січня 2023 року - 30 відсотків;
- з 1 січня 2024 року - 40 відсотків;
- з 1 січня 2025 року - 50 відсотків;
- з 1 січня 2026 року - 60 відсотків;
- з 1 січня 2027 року - 70 відсотків;
- з 1 січня 2028 року - 80 відсотків;
- з 1 січня 2029 року - 90 відсотків;
- з 1 січня 2030 року - 100 відсотків.

Впровадження подібних вимог в світі призвело до швидкого розвитку сфера прогнозування потужності СЕС. Для прогнозування потужності СЕС використовуються різноманітні джерела даних, такі як: традиційні погодні дані; дані з діючих СЕС; аерокосмічні спостереження за атмосферою; різні аналітичні методи і моделі прогнозу погоди (NWP-моделі). Ефективність цих засобів залежить від періоду прогнозування, періоду року, території, для якої проводиться прогнозування. Дані вимірів більше підходять для короткострокових прогнозів (декілька годин), а свою чергу аналітичні моделі показують більшу ефективність при прогнозуванні на термін більше шести годин [37]. Для підвищення точності прогнозів, можуть використовуватися методи, що комбінують різні підходи.

Прогнозування потужності СЕС умовно можна розділити на три види:

- Короткострокове прогнозування – горизонт прогнозування від

декількох хвилин до декількох годин. Застосовується для балансування навантаження і частотного регулювання.

– Середньостроковий прогнозування – горизонт прогнозування від декількох годин до кількох днів. Необхідно для продажу електроенергії через ринок, дозволяє підготувати енергосистему до перепадів потужності ВДЕ.

– Довгострокове прогнозування – горизонт прогнозування більше кількох днів. Застосовуються для економічного аналізу або планування розвитку енергосистем.

Також, прогнози можна поділити на ті, що стосуються однієї станції, і на ті, що стосується декількох СЕС розташованих на значній відстані одна від одної.

В залежності від типу прогнозу застосовується різні методи. В загальному, всі методи можна розбити на два типи на фізичні і статистичні. Фізичні використовують математичні моделі поведінки сонячної енергії, а статистичні визначають тенденцій на основі зібраного масиву даних. З цією метою можуть використовуватися дані метеорологічних спостережень, дані про технічний стан СЕС, дані про планові і аварійні відключення і інші.

Фізичні методи прогнозування враховують такі параметри, як: інтенсивність сонячної радіації; температура повітря; швидкість вітру. В залежності від типу СЕС може розраховуватися пряма і розсіяна інтенсивність сонячної радіації (для фотоелектричних панелей) або лише пряма (для параболоциліндричних концентраторів). Інтенсивність сонячної радіації і температура повітря впливають на температуру сонячної панелі. Зазвичай, при нагріванні сонячної панелі її потужність зменшується на 0,45 - 0,5% за кожен градус вище нормальної температури (зазвичай 25°C). Також, можуть враховуватися і такі фактори як: швидкість вітру, вологість, тощо. При прогнозуванні потужності на великих площах зазвичай детально моделюють поведінку тільки декількох об'єктів і використовують методи екстраполяції або інтерполяції.

З залежності від горизонту прогнозування можуть використовуватися різні

методології. Характеристики деяких методів прогнозування представлено в Таблиця 1.1 [71]. Одним з найпростіших модель є модель, що базується на екстраполюванні потужності СЕС з врахуванням тільки висоти сонця над горизонтом. Точність такого прогнозу значно зменшується при збільшенні горизонту прогнозування.

Таблиця 1.1 Характеристики методів прогнозування сонячної енергії

Метод	Частота вибірки	Розділова здатність	Просторова протяжність	Горизонт прогнозування
Модель постійності	висока	1 точка	1 точка	хвилини
Зображення неба знизу	30 с	10-100 м	3-8 км	десятки хвилин
Супутникове зображення хмар	15 хв	1 км	65°S – 65°N	до 5 год
Аналітичний прогноз погоди	1 год	2-50 км	вся планета	до 10 днів

Фотознімки неба використовують для прогнозування на 10-30 хвилин наперед. Для цього аналізуються серії фотознімків, знаходяться на них хмари і обчислюється їхні швидкості, напрямки руху. Для супутникових знімків застосовується аналогічний підхід. Освітленість земної поверхні розраховується за інтенсивністю кольору хмарного покриву. Недоліком використання супутникових знімків є значно нижча роздільна здатність, що негативно впливає на точність короткотермінового прогнозу. Тому, супутникові знімки головним чином використовуються для середньострокових прогнозів. Для збільшення точності прогнозування, крім знімків в видимому діапазоні, можуть використовувати знімки в інфрачервоному діапазоні. Це дозволяє збільшити точність ранкових прогнозів, оскільки в такому випадку є передісторії. Роздільна здатність зображень, зроблених ступниками на геостаціонарних орбіті, становить 1 км або більше. Однак, ці знімки покривають значну територією, що дозволяє прогнозувати рух хмар на тривалий інтервал часу наперед.

Для прогнозів з горизонтом прогнозування більше кількох годин, до яких можна віднести і прогнозування «на добу вперед», використовуються також моделі прогнозу погоди (NWP-моделі). Оскільки, кореляція індексу хмарності значно падає для таких прогнозів, знижуючи точність методів, що

використовують попередні дані не враховуючи їх динаміки.

На основі аналіз результатів використання різних методів прогнозування, можна стверджувати, що при прогнозуванні періодів з переважно сонячною погодою методи лінійної авторегресії показують кращі результати [37]. При прогнозуванні періодів з високою хмарністю гарні результати показують нейронні мережі з екзогенними параметрами. Стандартне відхилення похибки при прогнозуванні сонячної радіації цими методами становить 16 - 18 %. В деяких випадках, комбінація декількох методів дозволяє дещо покращити точність прогнозу.

При порівнянні точності методів, важливу роль грають умови, за яких здійснювалося прогнозування. Точність одного і того методу може значно залежати від регіону. Дослідження проведене міжнародним енергетичним агентством (IEA) [72] показало, що середньоквадратична похибка однієї і тієї моделі в Іспанії становить 20-35%, а в Центральній Європі 40-60%.

Найкращі результати при прогнозуванні з горизонтом в 1-2 дня показують The Global Forecast System (GEM) та European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) моделі у поєднанні з пост-обробкою. Похибка прогнозування інтенсивності сонячної радіації «на добу наперед» становить 5-10% для літа і 15-20% для зими [73]. Для деяких географічних точок і періоду часу помилка може досягати 50%. Середньоквадратична похибка цих методів складає в середньому 57-72%, або 100-140 Вт/м² в абсолютних величинах, що становить близько 45% потужності СЕС. Результати залежать від інтенсивності хмарності в регіоні, з збільшенням хмарності зменшується точність прогнозів.

В загальному випадку, прогнозування інтенсивності сонячної радіації більше ніж на 6 год надзвичайно складна задача, у зв'язку з хаотичною природою хмароутворення.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проаналізовано інформаційні технології управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системами

електропостачання за наявності акумулюючого елемента. Визначено основні проблеми, які виникають в процесі управління.

Встановлено, що потужність вітрових, сонячних або гібридних системи електропостачання може бути обмежена диспетчером мережі з метою збереження енергетичного балансу, а також, для підтримки стабільності енергодинамічних режимів роботи мереж загального користування. В умовах виробництва електроенергії відповідно до обмежень диспетчера мережі (графіка навантаження) і в умовах зміни параметрів зовнішнього середовища (швидкість вітру, інтенсивність сонячної радіації, тощо) актуальною є задача визначення активного складу, тобто набору вітрових електроустановок, які б найкращим чином забезпечили потреби користувачів з врахуванням ефективності кожної вітрової електроустановки.

Проведено аналіз існуючих підходів до формалізації і методів визначення активного складу вітрової електричної станції. Встановлено, що на даний момент модифікований метод динамічного програмування показує одні з найкращих результатів по точності знаходження розв'язку і швидкодії. Обґрунтовано, що застосування стохастичних методів, таких як штучні нейронні мережі і генетичні алгоритми, для розв'язання задачі знаходження активного складу є перспективним напрямком дослідження.

Встановлено, що для ефективної роботи блока управління гібридної системи електропостачання необхідно розробити модель акумулюючого елемента з врахування особливостей фізико-хімічних процесів і режиму заряду.

Також, один з необхідних елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень є метод прогнозування кількості енергії, яка може бути вироблена сонячною електричною станцією протягом заданого періоду часу з врахуванням хмарності в заданий момент часу. Відповідно до закону України «Про ринок електричної енергії» від 2017р. для продажу електроенергії на ринку необхідно на добу наперед надавати погодинний прогноз генерації електроенергії (графік навантаження). У разі відхилення генерації більше ніж на

10% (і на 5% з 2030р.) від поданого графіка навантаження виробник електроенергії повинен виплатити покупцю відшкодування.

На основі проведеного аналізу сучасних підходів до управління енергодинамічними режимами гібридних вітро-сонячних систем електропостачання сформульовано мету і задачі дослідження.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕМЕНТІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У даному розділі досліджено процеси управління енергодинамічними режимами роботи гібридних вітро-сонячних систем енергопостачання за наявності акумулюючого елемента (АЕ), розроблено набір продукційних правил для управління енергодинамічними режимами, розроблено модель перетворення сонячної енергії. Проведено аналіз даних інтенсивності сонячної радіації для уточнення значень коефіцієнта прозорості атмосфери для різних сезонів і метод прогнозування кількості електроенергії згенерованої сонячними панелями за заданий проміжок часу. Отримані результати використано в процесі розробки інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управління гібридною вітро-сонячною системою енергопостачання.

2.1 Розроблення бази продукційних правил для прийняття рішень на управління режимами

Наявність акумулюючого елемента у складі гібридної вітро-сонячної системи електропостачання (ГВССЕ) суттєво ускладнює процес управління такою системою, оскільки виникає ряд нових задач, що пов'язані з розподілом потоків енергії між різними елементами гібридної системи, між різними джерелами енергії (сонячні панелі, вітрові електричні установки, акумулюючий елемент) з одного боку і різними споживачами з іншого (акумулюючий елемент, навантаження).

Крім того, перед блоком управління (БУ) такої системи ставиться ряд і інших задач, а саме:

- забезпечення ефективного використання обладнання;
- забезпечення потреб споживача відповідно до графіка навантаження;
- покриття потреб споживача у період несприятливих погодних умов;

З описаних вище задач можна виділити декілька під-задач, а саме: мінімізація кількості включень/виключень ВЕУ, часті включень/виключень

призводять до зменшення періоду експлуатації і виведення з ладу деяких вузлів; мінімізація використання акумулюючого елемента; балансування потужності згенерованої різними джерелами енергії.

Блок управління гібридною системою енергопостачання можна розбити на три основні модуля: модуль попереднього опрацювання вхідних даних; модуль обробки даних; модуль представлення результатів. Структурна схема блоку управління гібридною системою електропостачання наведена на Рис. 2.1.

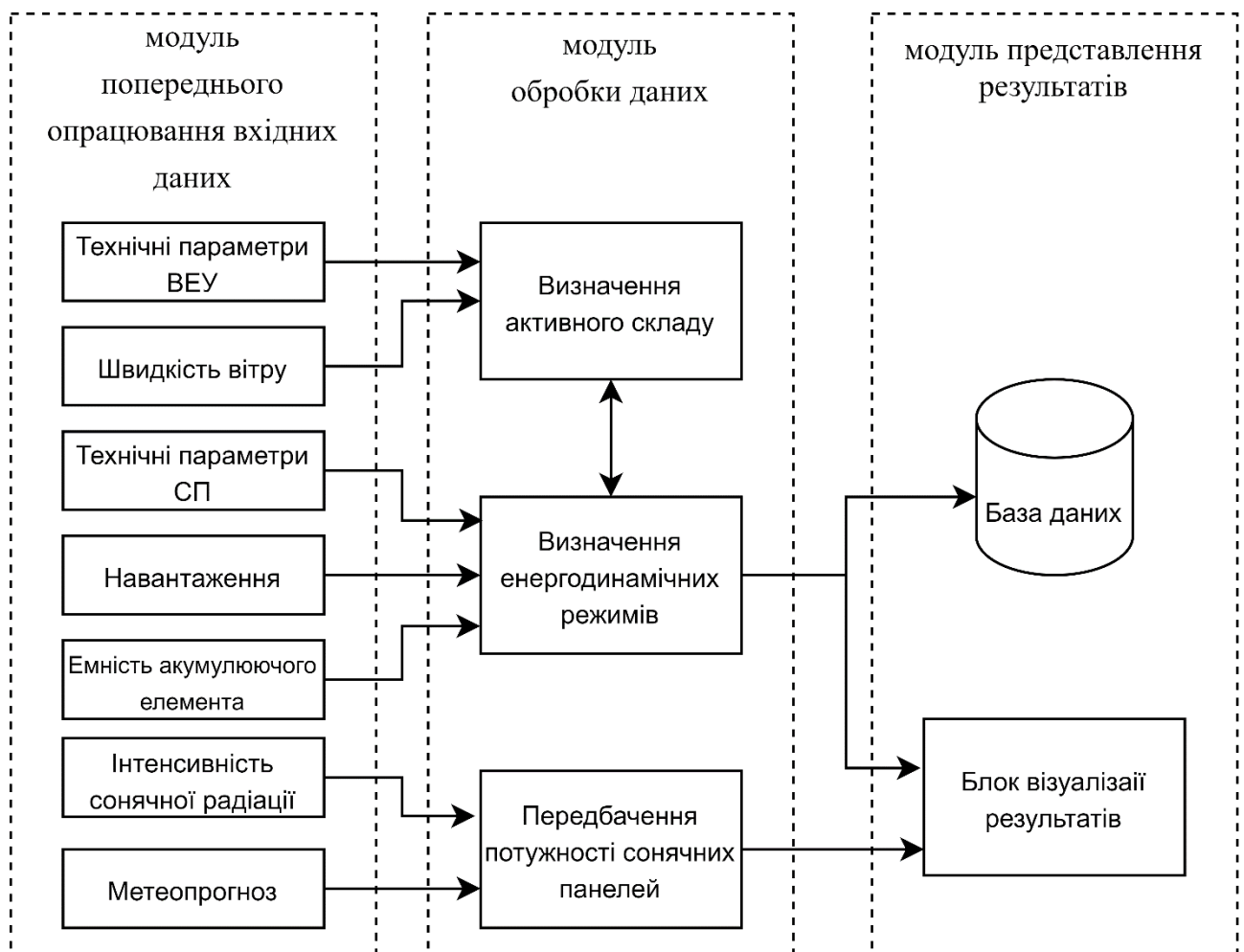


Рис. 2.1 Структурна схема блоку управління гібридною системою електропостачання

Модуль попереднього опрацювання вхідних даних приводить дані отримані з різних джерел до одного стандарту. Однією з задач модуля може бути перетворення не системних одиниць вимірювання в системні. Вхідними даними модуля є: швидкість вітру; інтенсивність сонячної радіації; енергетична ємність

акумулюючого елемента; інші технічні параметри вітрових електричних установок і сонячних панелей.

Модуль обробки даних виконує ряд задач, а саме: визначення потужності, яку необхідно згенерувати вітровими електричними станціями, сонячними панелями відповідно (енергодинамічні режими) до набору продукційних правил [73, 74]; визначення активного складу; передбачення потужність сонячних панелей; формування поради оператору системи, щодо управління енергодинамічними режимами.

Модуль представлення відповідає за візуалізацію отриманих результатів в інтуїтивно зрозумілому вигляді або за передачу їх за допомогою мережі.

Базу продукційних правил для управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання розроблено на основі описаних вище задач.

Продукційна система – це одна з системи представлення знань, що використовує правила вигляду «Якщо (умова) то (дія)» [75]. Така система зазвичай складається з трьох компонентів: база правил (набір правил); робоча пам'ять; логічний вивід. На Рис. 2.2 наведена схема взаємодії компонентів продукційної системи.

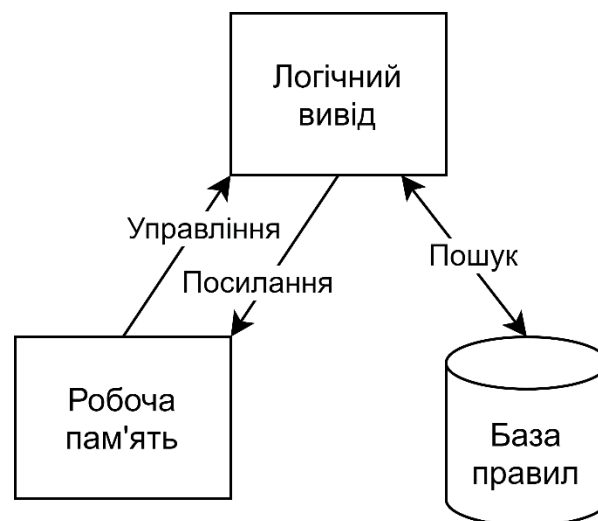


Рис. 2.2 Схема взаємодії компонентів продукційної системи

Робоча пам'яті – це пам'ять для короткочасного зберігання, в якій

зберігаються умови, що стосуються конкретної предметної області і результати виводів [75].

Системи такого типу є досить поширеними на даний момент. До них можна віднести: JBoss Drools; CLIPS; OpenL Tablets і інші. Розроблена база продукційних правил складається з таких правил:

- ЯКЩО $(P_B + P_C < P_H^-)$ ТО блок управління визначає новий активного складу ВЕС і за допомогою включення/виключення інверторів, до яких підключені сонячні панелі, змінюється P_C . Де, P_B – поточна потужність вітрової електричної станції (ВЕС), P_C – поточна потужність сонячної електричної станції (СЕС), P_H^- – нижня межа навантаження споживачів. Співвідношення між кількістю енергії, що виробляється вітровими електричними установками (ВЕУ) і сонячними панелями, а також пріоритетність використання енергії з одного з джерел задається оператором системи енергопостачання на основі техніко-економічної доцільності;
- ЯКЩО $(P_B + P_C - P_{AE} > P_H^+, 0 < Q < Q_{max})$ ТО блок управління визначає новий активного складу ВЕУ і P_C . Де, P_{AE} – максимальна потужність заряду ($-P_{AE}$) розряду ($+P_{AE}$) акумуляючого елемента, P_H^+ – верхня межа навантаження споживачів;
- ЯКЩО $(P_B + P_C > P_H^+, Q = Q_{max})$ ТО блок управління визначає новий активного складу ВЕУ і сонячної електростанції. Де, Q – поточна енергетична ємність акумуляючого елемента, Q_{max} – максимальна енергетична ємність акумуляючого елемента;
- ЯКЩО $(P_{B_{max}} + P_{C_{max}} < P_H^-, 0 < Q \leq Q_{max})$ ТО використовується енергія з акумуляючого елемента, оскільки для забезпечення потреб користувачів недостатньо сумарної енергії згенерованої ВЕС і СЕС. Де, $P_{B_{max}}$ – потужність вітрової електричної станції у разі запуску всіх вітряків, $P_{C_{max}}$ – максимальна потужність сонячної електричної станції;
- ЯКЩО $(P_B + P_C > P_H^-, 0 < Q < Q_{max})$ ТО акумуляючий елемент

заряджається за рахунок надлишку енергії, P_c і/або P_B змінюється таким чином, щоб сумарна потужність системи була в інтервалі $P_H^- \leq P_B + P_c - P_{AE} \leq P_H^+$;

– ЯКЩО ($P_B + P_c > P_H^-$, $Q = Q_{max}$) ТО P_c і/або P_B змінюється таким чином, щоб сумарна потужність системи була в інтервалі $P_H^- \leq P_B + P_c \leq P_H^+$;

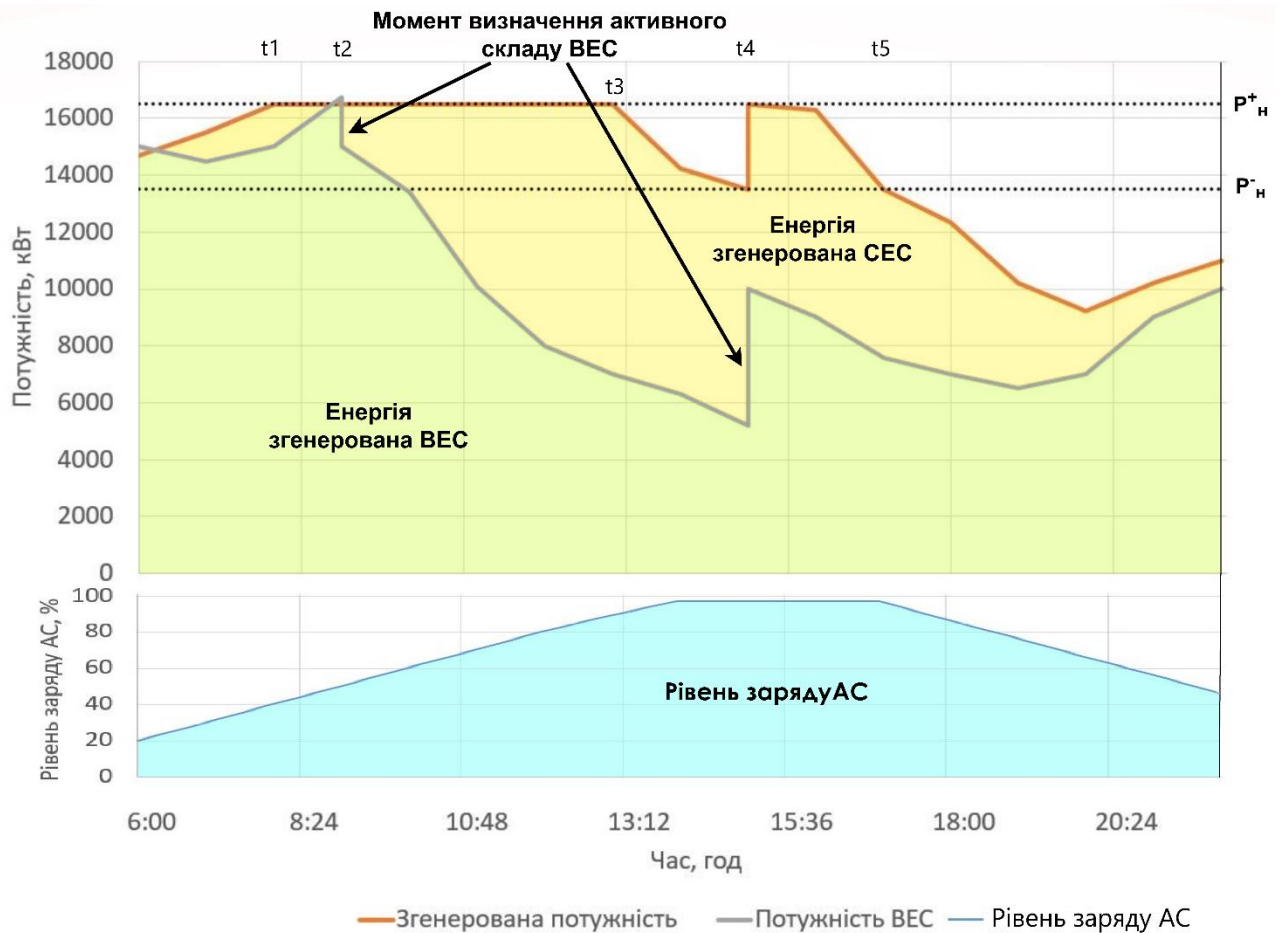


Рис. 2.3 Графік роботи блока управління ГВССЕ

На Рис. 2.3 схематично зображено процес роботи блока управління ГВССЕ. В момент часу t_1 сумарна потужність ($P_B + P_c - P_{AE}$) більша за максимально допустима (P_H^+), БУ починає відключати деякі сонячні панелі. В момент часу t_2 потужність ВЕС перевищує максимальну допустиму, БУ знаходить новий активний склад. У зв'язку з падінням швидкості вітру, в момент часу t_3 сумарна потужність стає меншою ніж максимальна допустима, визначення нового активного складу не виконується. В момент часу t_4

відбувається знаходження нового активного складу, оскільки сумарна згенерована потужність менша мінімально допустимої (P_H^-). В момент часу t_5 сумарна потужність всіх сонячних панелей і ВЕУ менша ніж мінімально допустима, для забезпечення потреб користувачів використовується електроенергія з АЕ.

2.2 Розроблення моделі процесів заряду-розряду акумулюючого елемента

Основна проблема розроблення математичної моделі акумулюючого елемента – це велика кількість нелінійних залежностей, які необхідно описати. Одна з таких залежностей – це залежність між ККД заряду-розряду акумулюючого елемента. Складність полягає в тому, що ККД залежить від поточної енергетичної ємності акумулюючого елемента, температури, навантаження, тобто від струму, що проходить у колі, і інших факторів [76]. Тому, для спрощення моделі акумулюючого елемента, можна припустити, що ККД заряду-розряду не залежить від струму заряду і рівня заряду акумулюючого елемента [77] та визначається як:

$$\eta_{\text{зар}} = \eta_{\text{роз}} = \sqrt{\eta_{\text{АК}}}, \quad (2.1)$$

де $\eta_{\text{зар}}$ – ККД заряду акумулюючого елемента, $\eta_{\text{роз}}$ – ККД розряду акумулюючого елемента, $\eta_{\text{АК}}$ – узагальнений ККД акумулятора. ККД сучасних акумуляторів 85-95% залежно від типу [78].

Однією з особливостей акумулюючого елемента є саморозряд. Під саморозрядом розуміють втрату хімічної енергії, прийнятої акумулятором, внаслідок побічних реакції на пластинах обох полярностей [78]. Рівень саморозряду залежить від типу акумулюючого елемента, якості виробництва (кількості домішок в металі), часу експлуатації, а також від умов зберігання. Для свинцево-кислотних акумуляторів саморозряд зазвичай складає 0,5-2% в день, для літій-йонних акумуляторів саморозряд становить 5-7% в рік при зберіганні

при кімнатній температурі [79]. У зв'язку з низьким рівнем саморозряду для літій-йонних акумуляторів ним можна знехтувати.

Режим заряду акумулятора також накладає суттєві обмеження. Найбільш популярним режимом заряду акумулятора є заряд постійним струмом – постійною напругою (CC/CV). Режим полягає в розбитті процесу заряду акумулятора на два етапи. На першому етапі відбувається заряд акумулятора постійним струмом (CC). Величина сили струму, якою відбувається заряд, є максимально допустимою силою струму заряду-розряду ($I_{\text{макс}}$), це значення можна отримати з технічного паспорта, зазвичай, максимальний струм заряду і розряду знаходиться в межах $0.2C - 2C$ [78, 79], де C – ємність акумуляуючого елемента. Тобто, при заряді акумулятора силою струму $I_{\text{макс}}$ для повного заряду необхідно 5 годин якщо $0.2C$ і 30 хв якщо $2C$.

Коли напруга на клеммах акумулятора досягає певної порогової величини ($U_{\text{пор}}$), заряд продовжується в режимі сталої напруги (CV). Значення $U_{\text{пор}}$ є константою і зазвичай відповідає заряду акумулятора на 60-80% [80, 81]. В такому випадку, сила струму зменшується експоненціально з часом [80], цей процес описується залежністю:

$$I(t) = I_{\text{макс}} * \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right), \quad (2.2)$$

$$\tau = \frac{C_{\text{ном}}}{I_{\text{макс}}} - t_{\text{пор}}, \quad (2.3)$$

де t – поточний момент часу, $I_{\text{макс}}$ – максимально допустима сила струму заряду-розряду, $t_{\text{пор}}$ – момент часу, коли відбувся перехід в режим сталої напруги, $C_{\text{ном}}$ – номінальна енергетична ємність акумуляуючого елемента.

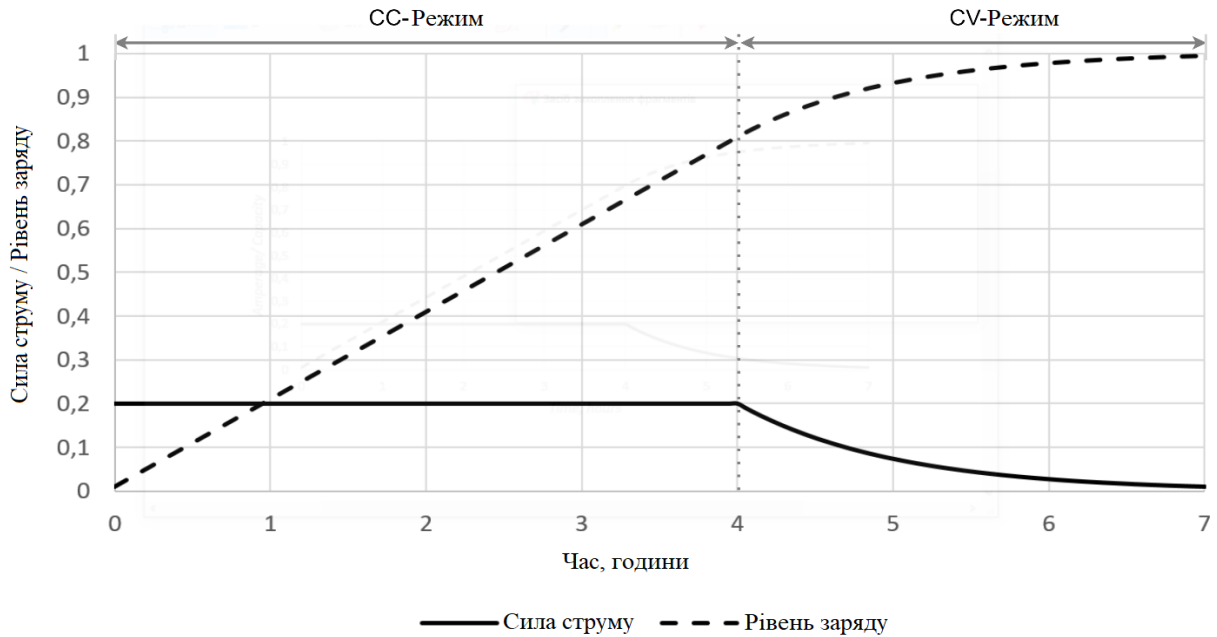


Рис. 2.4 Схематичне зображення роботи методу CC/CV

Заряд закінчується коли напруга на клеммах акумулятора складає 97-99% від номінального рівня, або не змінюється протягом певного періоду часу [81, 82]. Заряд акумуляюючого елемента в режимі CC/CV подано схематично на Рис. 2.4.

З врахуванням наведених результатів, кількість енергії ($P_{\text{макс роз}}$), яку АЕ може віддати за одиницю часу, не може бути більша ніж:

$$P_{\text{макс роз}} = U_{\text{ак}} I_{\text{макс}} \eta_{\text{роз}}, \quad (2.4)$$

де $U_{\text{ак}}$ – напруга на клеммах акумуляюючого елемента. Для спрощення моделі акумуляюючого елемента, можна припустити, що напруга на акумуляюючого елемента не залежить від режиму роботи і завжди дорівнює номінальній напрузі ($U_{\text{ак}}$) [77]. Беручи до уваги, що $I_{\text{макс}} = C t_{\text{н}}^{-1}$, тоді:

$$U_{\text{ак}} I_{\text{макс}} = U_{\text{ак}} C t_{\text{н}}^{-1} = E_{\text{ак}} t_{\text{н}}^{-1}, \quad (2.5)$$

де $E_{\text{ак}}$ – енергія акумуляюючого елемента. Тоді, $P_{\text{макс роз}} = E_{\text{ак}} \eta_{\text{роз}} t_{\text{н}}^{-1}$.

Обмеження, що накладає метод заряду CC/CV можна записати як:

$$P_{\text{макс зар}} = \begin{cases} U_{\text{ак}} I_{\text{макс}} \eta_{\text{зар}}, & C(t) \leq C_{\text{пор}} \\ U_{\text{ак}} I_{\text{макс}} k \eta_{\text{зар}}, & C(t) > C_{\text{пор}} \end{cases}, \quad (2.6)$$

$$k = \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right), \quad (2.7)$$

де $C(t)$ – поточна енергетична ємність акумулюючого елемента, $C_{\text{пор}}$ – енергетична ємність при якій відбувається перехід в режим заряду постійною напругою, відповідає 60-80% від номінальної енергетичної ємності акумулюючого елемента. Підставивши вираз (2.5) у (2.6), отримаємо:

$$P_{\text{макс зар}} = \begin{cases} E_{\text{АК}}\eta_{\text{зар}}t_{\text{н}}^{-1}, C(t) \leq C_{\text{пор}} \\ E_{\text{АК}}k\eta_{\text{зар}}t_{\text{н}}^{-1}, C(t) > C_{\text{пор}} \end{cases} \quad (2.8)$$

Для випадку коли $C(t) > C_{\text{пор}}$, $C(t)$ можна записати як:

$$C(t) = C_{\text{пор}} + I_{\text{макс}} \int_0^{t-t_{\text{пор}}} \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right) dt, \quad (2.9)$$

$$C(t) = C_{\text{пор}} + I_{\text{макс}}\tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right)\right), \quad (2.10)$$

$$C(t) = C_{\text{пор}} + C_{\text{ном}}t_{\text{н}}^{-1}\tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right)\right), \quad (2.11)$$

Підставивши вираз (2.7) у (2.11) і отримаємо:

$$C(t) = C_{\text{пор}} + t_{\text{н}}^{-1}C_{\text{ном}}\tau(1 - k), \quad (2.12)$$

$$k = 1 - \frac{C(t) - C_{\text{пор}}}{t_{\text{н}}^{-1}C_{\text{ном}}\tau}, \quad (2.13)$$

Для перевірки точності описаної вище моделі процесів заряду-розряду акумулюючого елемента проведено порівняльний аналіз розробленої моделі з еквівалентною схемою акумулюючого елемента, що описана в роботах [47, 83, 84]. В Таблиця 2.1 подано технічні параметри акумулюючого елемента номінальною потужністю 1 МВт*год, що описаний в згаданих вище роботах.

Таблиця 2.1 Технічні параметри акумулюючого елемента

Акумулюючий елемент в загальному	П'ять 200 кВт*год елементів підключених паралельно
200 кВт*год елементи	Два 100 кВт*год елементів підключених паралельно
100 кВт*год елементи	Десять 20 кВт*год модулів підключених послідовно
Модуль	Двадцять чотири 120 А*год одиночних батареї підключених послідовно
Ємність одиночної батареї	120 А*год (дві батареї підключених паралельно)
Номінальна потужність	5 * 200 кВт*год = 1 МВт
Максимальна робоча напруга	840 В
Мінімальна робоча напруга	696 В

Відповідно до виразу (2.4) максимальна потужність розряду акумулюючого елемента залежить від: напруга акумулюючого елемента;

максимально допустима сила; ККД розряду.

В загальному випадку напругу акумулюючого елемента (V_{ae}) можна визначити за допомогою відношення:

$$V_{ae} = V_{нрз} - I_{bat}R_{зар}$$

де $V_{нрз}$ – напруга розімкненого кола, I_{bat} – сила струму, що проходить через один акумулюючий елемент, $R_{зар}$ – опір акумулюючого елемента. При заряду акумулюючого елемента сила струму береться зі знаком «-», а при розряді з «+». Напруга розімкненого кола і опір акумулюючого елемента – це величини, що залежать від багатьох факторів: типу акумулюючого елемента; рівня заряду елемента; температура експлуатації; ступінь деградації елемента; тощо. У зв'язку, з чим зазвичай ці параметри встановлюються експериментальним шляхом. Залежність між напругою розімкненого кола і рівнем заряду представлена на Рис. 2.5, а між опір акумулюючого елемента і рівнем заряду на Рис. 2.6.

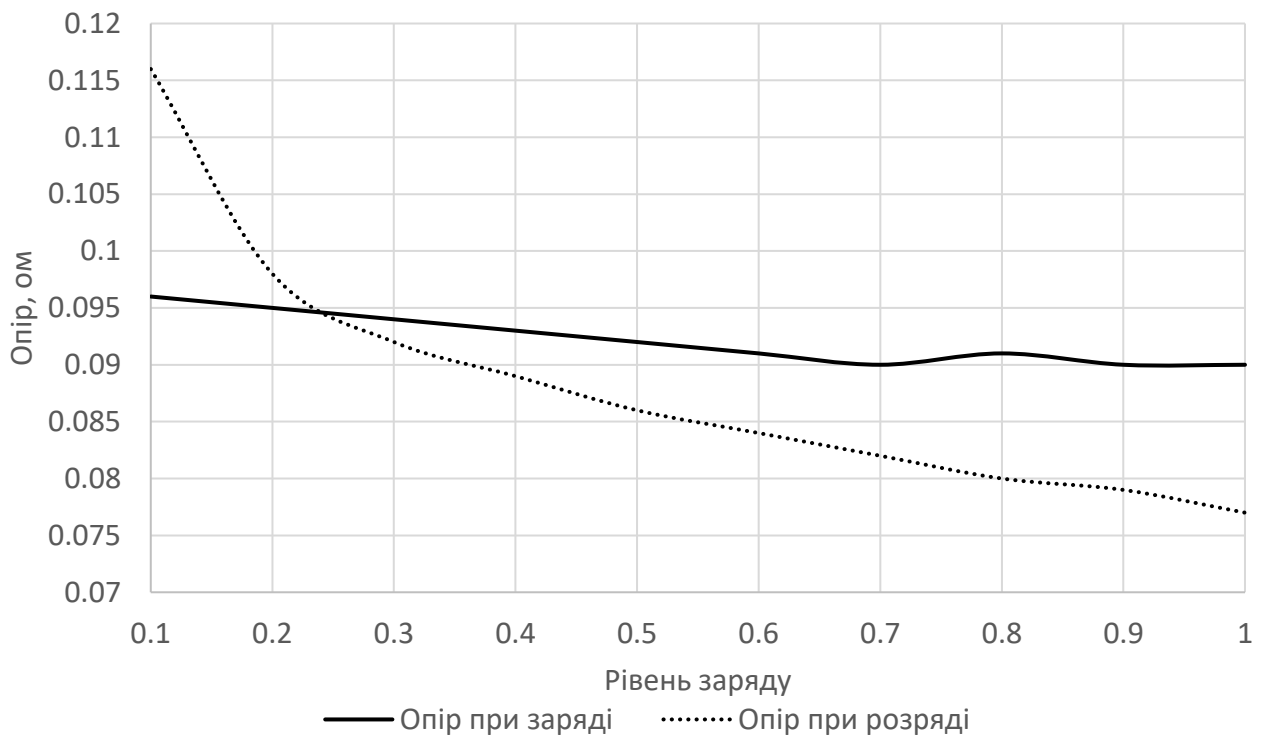


Рис. 2.5 Залежність між опором одиничного елемента батареї і рівнем заряду (SOC)

На основі даних наведених в роботі [47], розраховано, що ємність 1 МВт*год складає 1200 А*год. Якщо $t_n^{-1} = 0.2$, тоді максимально допустима сила струму ($I_{\text{макс}}$) становить 240 А.

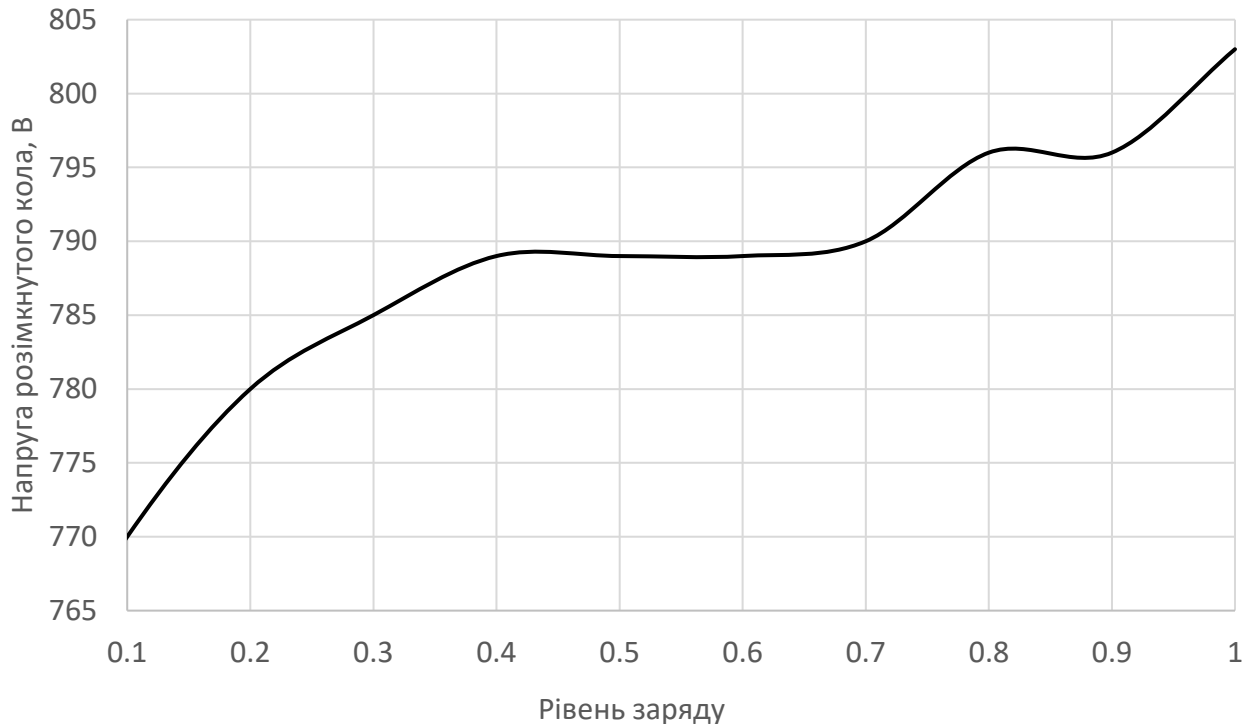


Рис. 2.6 Залежність між напругою розімкнутого кола і рівнем заряду (SOC)

ККД акумулюючого елемента залежить від сили струму і рівня заряду елемента (State of Charge, SOC). В загальному випадку ККД обчислюється за допомогою виразу:

$$\eta = \begin{cases} \eta_{\text{зар}} = \frac{V_{\text{нрз}}}{V_{\text{нрз}} - I_{\text{bat}} R_{\text{зар}}} \\ \eta_{\text{роз}} = \frac{V_{\text{нрз}} - I_{\text{bat}} R_{\text{роз}}}{V_{\text{нрз}}} \end{cases} \quad (2.14)$$

де $V_{\text{нрз}}$ – напруга розімкнутого кола, I_{bat} – сила струму, що проходить через один акумулюючий елемент, $R_{\text{зар}}$ – опір акумулюючого елемента. Залежність між напругою розімкнутого кола і рівнем заряду представлена на Рис. 2.5, а між опором акумулюючого елемента і рівнем заряду на Рис. 2.6.

На основі наведених вище даних, обчислено ККД акумулюючого елемента для різних рівнів заряду і сил струму, отримані залежності представлені на Рис. 2.7 і Рис. 2.8.

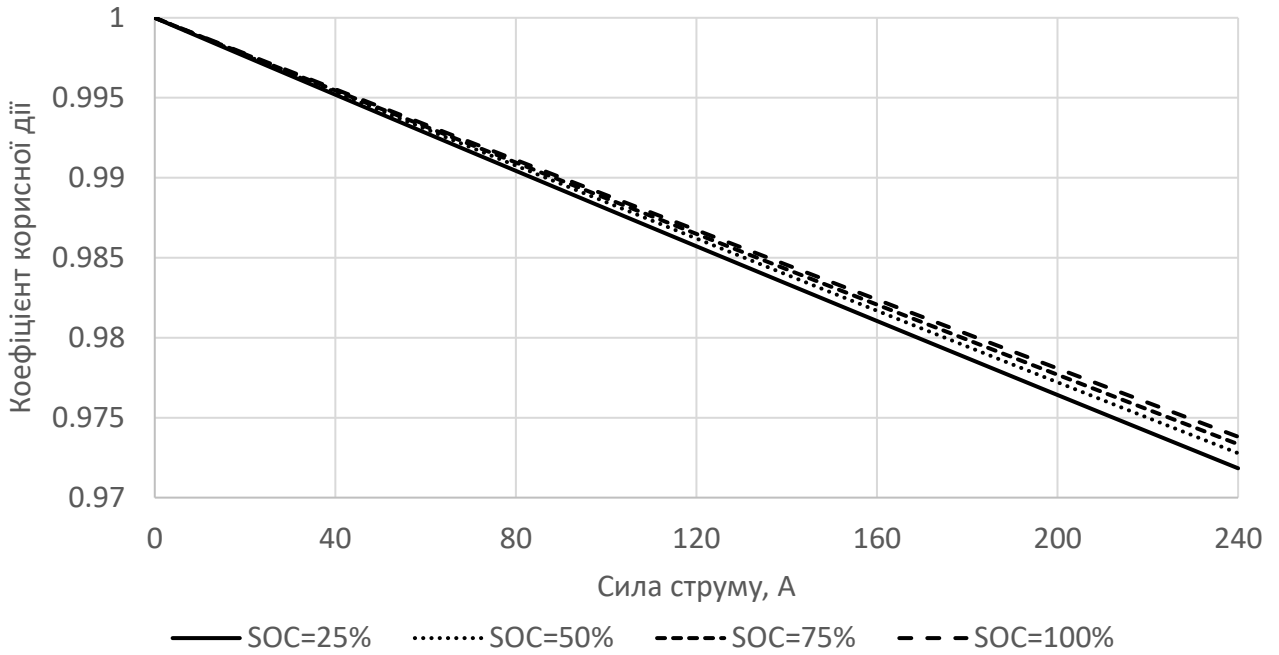


Рис. 2.7 Залежність між ККД заряду акумулюючого елемента і різних сил струму при рівнем заряду

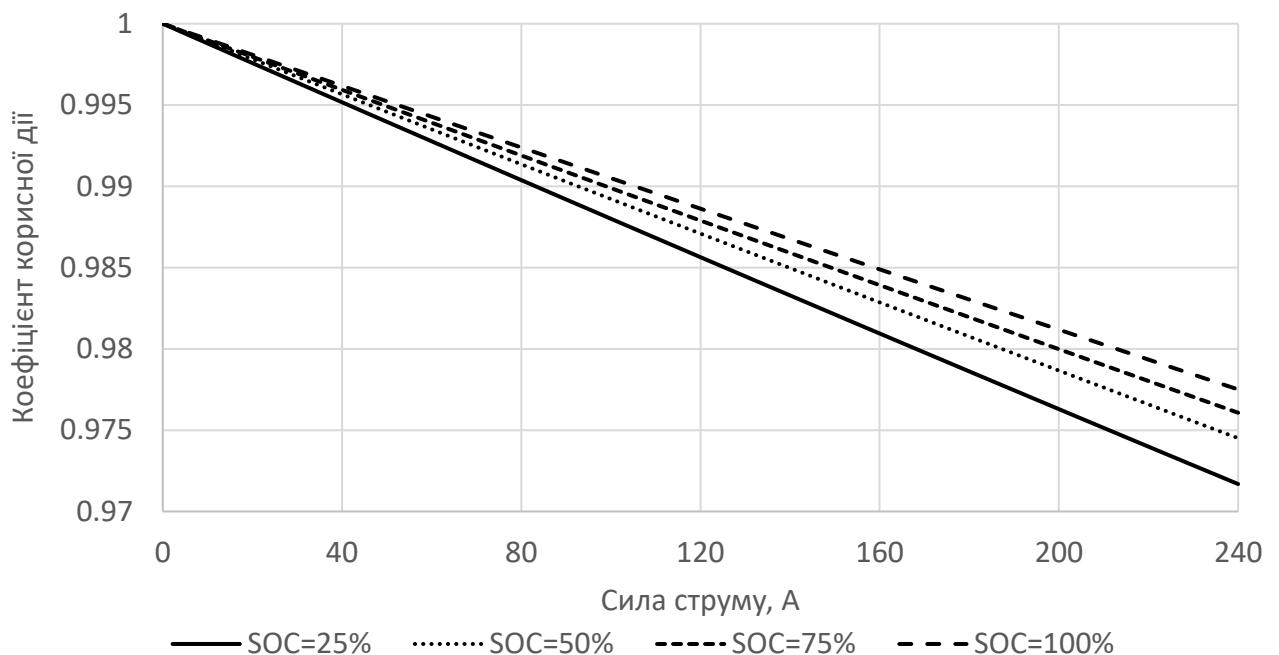


Рис. 2.8 Залежність між ККД розряду акумулюючого елемента і різних сил струму при рівнем заряду

Для описаних вище моделей акумулюючого елемента наведено обмеження максимальної потужності заряду-розряду елемента, ємністю 1 МВт*год, з

використанням режиму CC/CV. Отримані залежності представлено відповідно на Рис. 2.9 і Рис. 2.10.

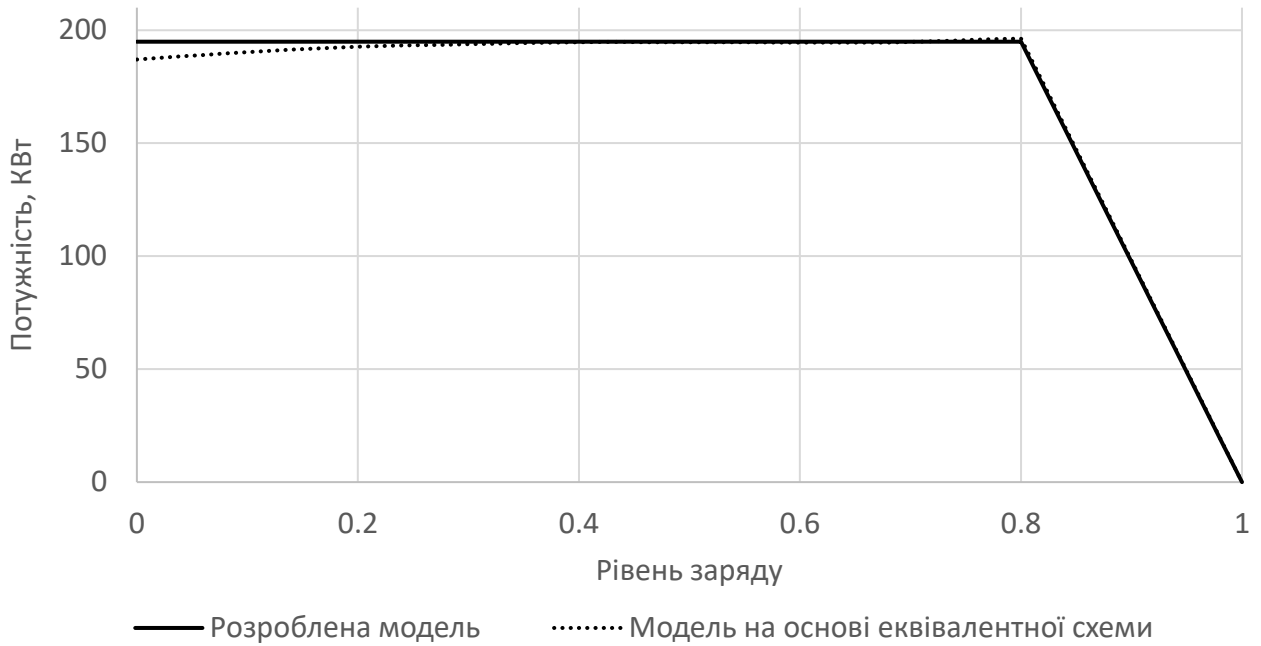


Рис. 2.9 Графік максимальної потужності заряду акумуляючого елемента

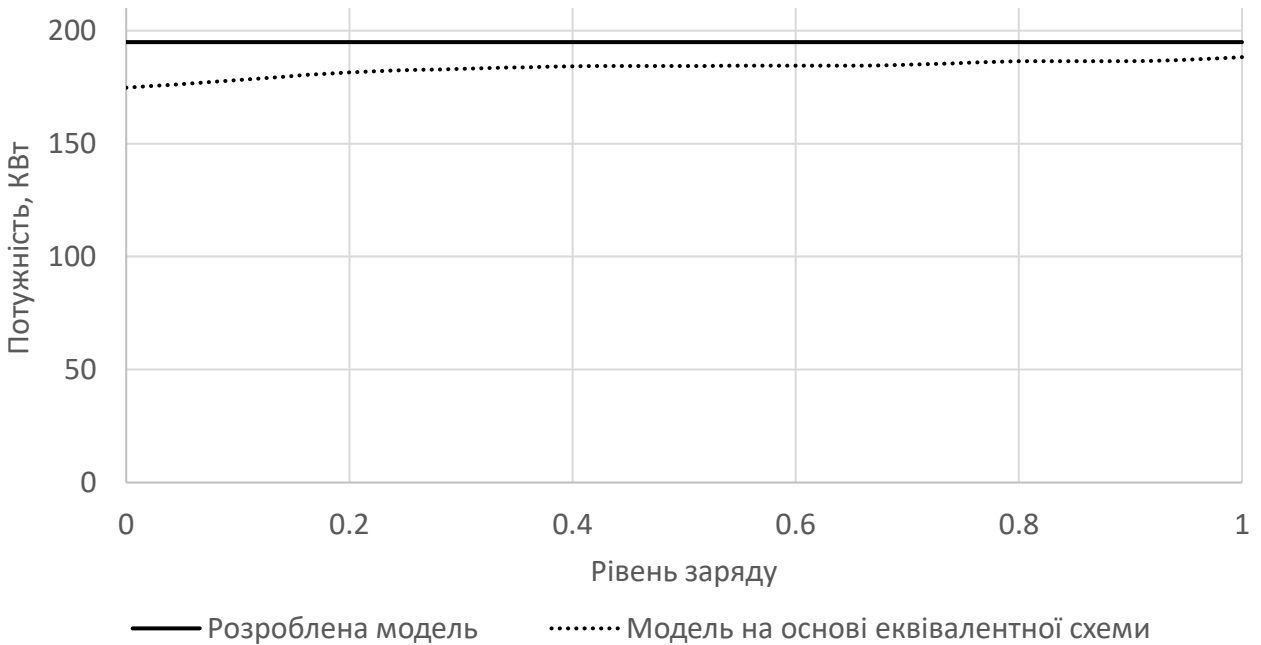


Рис. 2.10 Графік максимальної потужності розряду акумуляючого елемента

На основі отриманих результатів, можна стверджувати, що максимальне відхилення при заряді між розробленою моделлю і еквівалентною схемою

акумулюючого елемента складає 4%, а в середньому розроблена модель завищує максимальну потужність заряду на 1%. При розряді максимальне відхилення становить 10% у випадку, коли рівень заряду акумулюючого елемента близький до нуля, в середньому розроблена модель завищує максимальну потужність розряду на 6%.

Порівнюючи розроблену модель і еквівалентну схему акумулюючого елемента, можна зробити висновок, різниця між максимальною потужністю заряду-розряду для описаних моделей не перевищує 10%, а в середньому становить 3,5%. За відсутності детальної технічної документація акумулюючого елемента, розроблена модель може бути використана замість інших моделей.

2.3 Моделювання режиму перетворення сонячної енергії

Оцінка кількості енергії, яку здатна виробити СЕС за певний період часу – це комплексна задача, оскільки кількість енергії залежить від багатьох факторів. Останні фактори можна розділити на групи: технічні характеристики сонячної панелі та фактори навколишнього середовища.

До першої групи можна віднести вольт-амперну характеристику сонячних панелей, напругу холостого ходу, струм короткого замикання та інші фактори.

До другої групи відносять інтенсивність сонячної радіації, що надходить на одиницю поверхні сонячної панелі, температуру повітря, вологість повітря, а також атмосферний тиск. Аналізуючи результати отримані у роботі Юрченка А.В. [85], можна стверджувати, що основним фактором є кількість сонячної радіації, що падає на сонячні панелі. Вплив інших факторів малим, тому ним можна знехтувати.

Кількість енергії, яка може бути вироблена сонячною панеллю (E) визначається залежністю:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} f_{tr}(f_i(t))dt, \quad (2.15)$$

де f_i – функція, що описує залежність сумарної інтенсивності сонячної радіації,

що потрапляє на одиницю поверхні сонячних панелей, від часу; f_{tr} – функція, що описує залежність потужність сонячних панелей від сумарної інтенсивності сонячної радіації, що потрапляє на її поверхню.

Для моделювання процесу перетворення сонячної енергії в електричну використовують декілька методів [85], а саме: метод на основі коефіцієнта корисної дії (ККД), метод поправочних коефіцієнтів, метод на основі фізичної моделі, а також статистичні методи.

Для моделювання процесу перетворення сонячної енергії в електричну використано метод моделюванні на основі ККД. Даний метод використано, оскільки він не потребує великої кількості статистичних даних, на відміну від статистичного методу, і не вимагає даних про вольт-амперну характеристику сонячних панелей, тобто:

$$f_{tr}(I) = kI, \quad (2.16)$$

де k – коефіцієнт, що описує ефективність перетворення сонячної енергії в електричну енергію сонячною панеллю.

В загальному випадку, сумарна інтенсивність сонячної радіації визначається залежністю:

$$Q_{\text{пох}} = B_{\text{пох}} + D_{\text{пох}} + R_{\text{пох}}, \quad (2.17)$$

де $B_{\text{пох}}$ – інтенсивність прямої сонячної радіації, що падає на сонячні панелі, Вт/м²; $D_{\text{пох}}$ – інтенсивність розсіяної сонячної радіації, що падає на сонячні панелі, Вт/м²; $R_{\text{пох}}$ – інтенсивність відбитої сонячної радіації, що падає на сонячні панелі, Вт/м². Інтенсивність відбитої сонячної радіації не буде врахована, оскільки її вплив мізерно малий, в даному випадку.

Сумарну інтенсивність сонячної радіації, що падає на сонячні панелі можна обчислити за допомогою залежності:

$$Q_{\text{сер}} = B_{\text{пох}}(1 - k_{\text{зат}}) + D_{\text{пох}}, \quad (2.18)$$

де $k_{\text{зат}}$ – коефіцієнта затемнення, це коефіцієнт що показує який відсоток панелі знаходяться в тіні від іншої панелі в даний момент часу. Для знаходження інтенсивність прямої сонячної радіації використаємо залежність Кастрова [86]:

$$B_{\text{пох}} = \frac{B_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + P} \cos \theta, \quad (2.19)$$

де B_0 – сонячна стала, Вт/м²; α – висота сонця над горизонтом; P – коефіцієнт прозорості атмосфери; θ – кут між нормаллю до сонячної панелі і напрямком падіння сонячних променів.

Сонячна стала (B_0) – це інтенсивність сонячної радіації на одиницю перпендикулярної до променів поверхні перед входження в земну атмосферу [87]. При середній відстані між Землею і Сонцем це значення складає 1353 Вт/м², проте в залежності від місяця значення сонячної сталої змінюється від 1321 Вт/м² на початку липня до 1412 Вт/м² на початку січня. Таким чином, річна варіація сонячної сталої складає 6,9%.

Кут між нормаллю до сонячної панелі і напрямком падіння сонячних променів можна визначити за допомогою співвідношення:

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{if } \alpha < 0, \beta < 0 \\ 0, & \text{if } \beta_{sun} < 0 \\ \arctg(\sqrt{tg(\alpha)^2 + tg(\beta)^2}), & \\ \text{if } \alpha > 0, \beta > 0, \beta_{sun} > 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

де A – кут між нормаллю сонячних панелей і сонцем; $I_{\text{п}}$ – інтенсивність сонячної радіації на одиницю перпендикулярної до променів поверхні на рівні землі; α – проекція кута між нормаллю сонячних панелей і сонцем на горизонтальну площину сонячних панелей; β – проекція кута між нормаллю сонячних панелей і сонцем на вертикальна площину сонячних панелей; β_{sun} – висота сонця над горизонтом. На Рис. 2.11 проілюстровано розташування згаданих вище величин. На рисунку нормаль до сонячної панелі позначена як СП-Н.

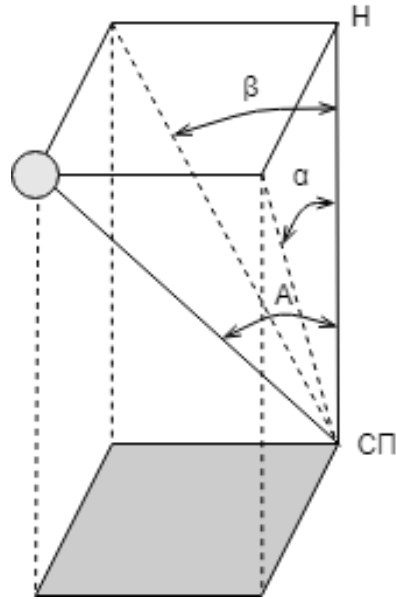


Рис. 2.11 Схематичне представлення кутів піж нормаллю до сонячної панелі і позицією сонця

Коефіцієнт затемнення $k_{\text{зат}}$ – це відношення між площею сонячних панелей, що напряму освітлюється сонцем і площею сонячних панелей, що знаходяться в тіні. Частина панелі знаходиться в тіні, якщо довжина тіні ряду сонячних панелей більша ніж відстань між рядами сонячних панелей (d). На Рис. 2.12 представлена схема встановлення сонячних панелей рядами з фіксованим кутом нахилу.

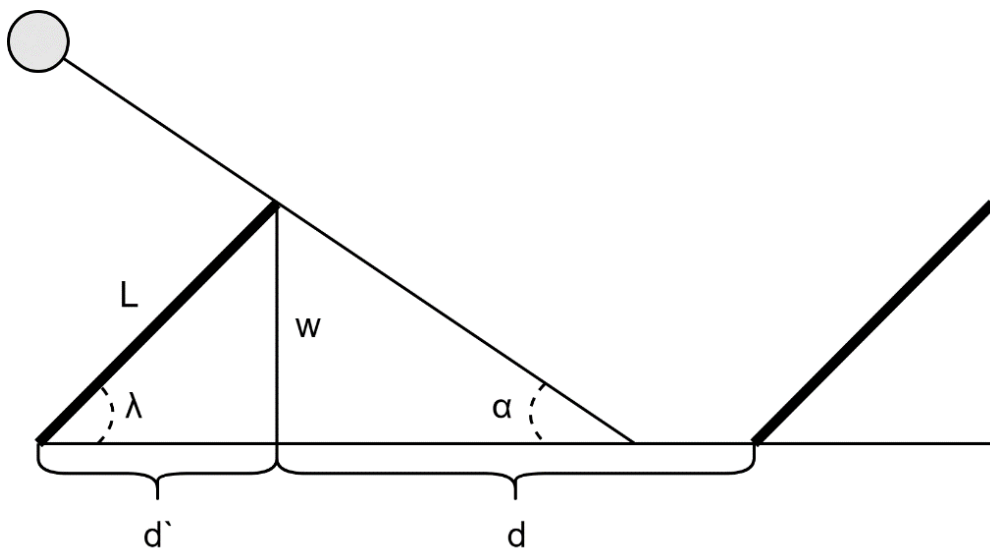


Рис. 2.12 Розрахункова схема

де λ – кут нахилу сонячних панелей, d – відстань між рядами; d' – ширина одного ряду сонячних панелей; L – довжина сонячної панелі; w – висота ряду сонячних панелей; $\acute{\alpha}$ – проекція кута між горизонтом і сонцем на площину перпендикулярну до ряду сонячних панелей. Відстань між рядами сонячних панелей можна представити як $d = kw$, де k – коефіцієнт [88]. Тоді, умову часткового затемнення можна записати, як:

$$\frac{w \cos(\gamma)}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha})} \leq d \quad (2.21)$$

де γ – модуль різниці між азимутом сонця і азимутом сонячних панелей. Підставивши kw замість d , отримаємо:

$$\frac{\cos(\gamma)}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha})} \leq k \quad (2.22)$$

На основі розрахункової схема, що представлена на Рис. 2.13, можна скласти систему рівнянь для визначення коефіцієнта затемнення для випадку, якщо довжина тіні ряду сонячних панелей більша ніж відстань між рядами сонячних панелей:

$$\begin{cases} l_1 \operatorname{tg}(\lambda) = w' \\ (L_{\text{тінь}} - l_1) \operatorname{tg}(\acute{\alpha}) = w' \end{cases} \quad (2.23)$$

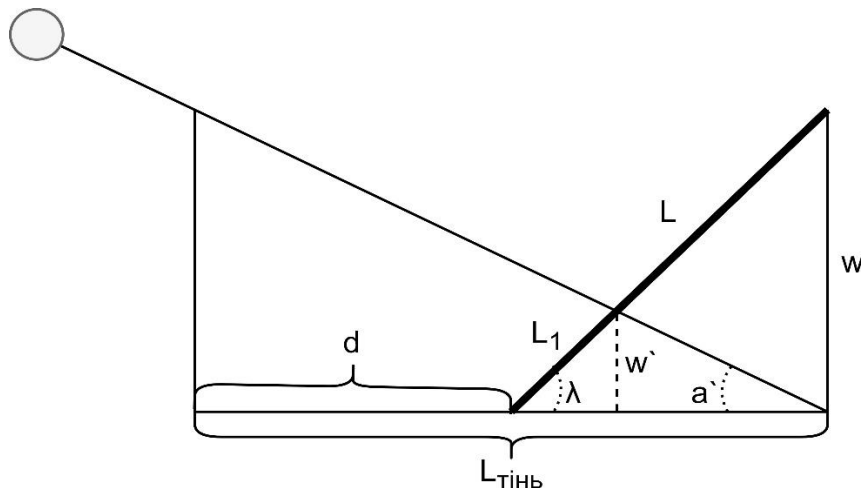


Рис. 2.13 Розрахункова схема

Розв'язавши систему рівнянь (2.23) отримаємо:

$$w' = \frac{\operatorname{tg}(\acute{\alpha}) \operatorname{tg}(\lambda) L_{\text{тінь}}}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha}) + \operatorname{tg}(\lambda)} \quad (2.24)$$

$$L_{\text{тінь}} = \frac{w \cos(\gamma)}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha})} - d \quad (2.25)$$

Поділивши вираз (2.24) на w отримаємо шукане відношення між площею сонячних панелей в тіні і загальною площею. Таким чином, коефіцієнт затемнення можна обчислити за допомогою виразу:

$$k_{\text{зат}} = \begin{cases} 1, \alpha \leq 0 \\ \frac{\cos(\gamma) - k \operatorname{tg}(\acute{\alpha})}{1 + \operatorname{tg}(\acute{\alpha})/\operatorname{tg}(\lambda)}, \frac{\cos(\gamma)}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha})} \leq k \\ 0, \frac{\cos(\gamma)}{\operatorname{tg}(\acute{\alpha})} > k \end{cases} \quad (2.26)$$

За допомогою методів описаних в [89, 90] і в роботах інших авторів можна визначити азимут і висоту сонця для заданої географічної точки. Підходи до обчислення позиції сонця в заданий час для заданої географічної точки наведені в роботах [91, 92, 89].

Для обчислення інтенсивності розсіяної сонячної радіації використано модель Дж. Хела [91, 89]:

$$D_{\text{пох}} = D_{\text{гор}} F \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + (1 - F) \cos^2 \theta, \quad (2.27)$$

$$F = \frac{B_{\text{гор}}}{B_{0\text{гор}}}; \quad D_{\text{гор}} = \frac{1}{3} (B_0 - B_{\text{орт}}), \quad (2.28)$$

де $D_{\text{гор}}$ – інтенсивність розсіяної сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню, Вт/м²; $B_{\text{гор}}$ – інтенсивність прямої сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню, Вт/м²; $B_{0\text{гор}}$ – інтенсивність прямої сонячної радіації, що падає на горизонтальну поверхню, без врахування розсіювання в атмосфері, Вт/м²; $B_{\text{орт}}$ – інтенсивність прямої сонячної радіації, що падає на ортогональну поверхню, Вт/м². На Рис. 2.14 наведено приклад моделювання потужності сонячної електричної станції протягом дня.

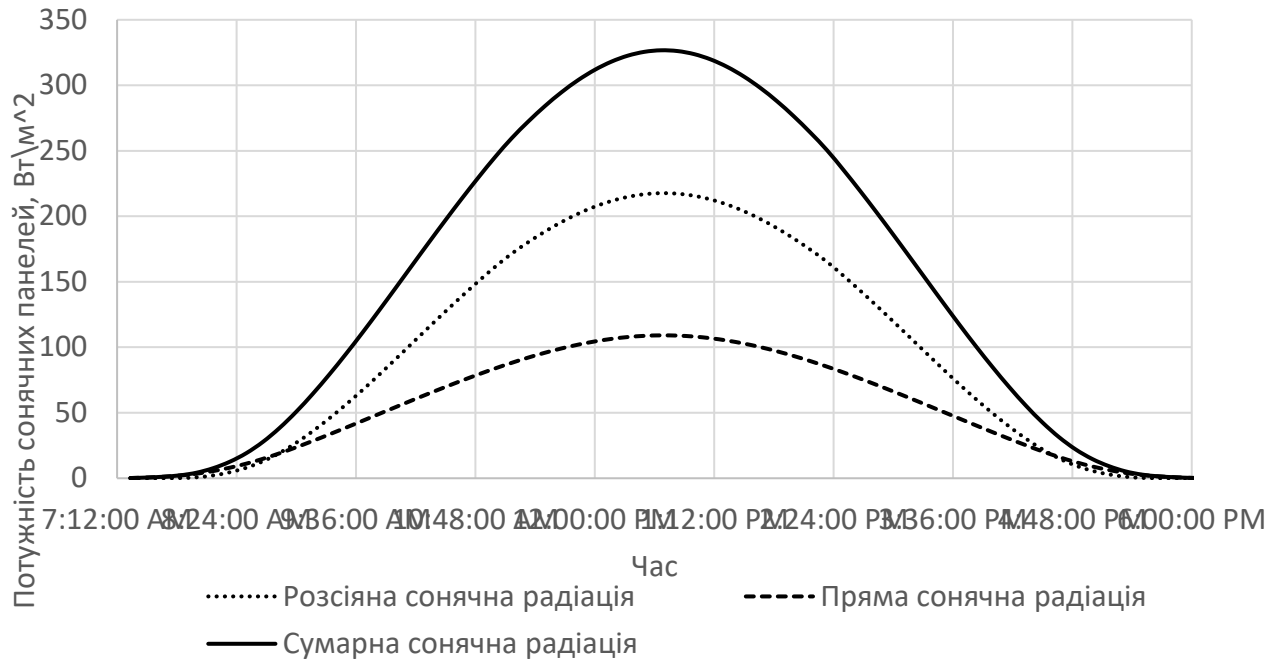


Рис. 2.14 Моделювання потужності СЕС протягом однієї доби

Отже, для знаходження сумарної інтенсивності сонячної радіації протягом заданого періоду часу необхідно виконати певну послідовність дій. Блок-схема цієї послідовності представлена на Рис. 2.15.

За допомогою градієнтного методу сходження з подібненням кроку [93] проведено оптимізацію за двома параметрами, такими як: відношення відстань між рядами сонячних панелей і висотою сонячних панелей (k); кутом нахилу сонячних панелей (λ). Тобто:

$$f(k, \lambda) \rightarrow \max, k \in [0,4; 5], \lambda \in [0; 120], \quad (2.29)$$

Це різновид градієнтного методу вибрано оскільки, для цього методу не потрібно задавати величину кроку на початку роботи алгоритму. Величина кроку визначається на кожній ітерації за допомогою методу золотого перетину [93]. На Рис. 2.16 зображено блок-схему алгоритму.

Межі зміни параметра $k \in [0,4; \infty]$. При малих значеннях k модель Дж. Хела, що використовується для обчислення інтенсивності розсіяної радіації, завишає значення інтенсивності розсіяної радіації. Межі зміни параметра $\lambda \in [0^\circ; 180^\circ]$, пошук екстремумів за межами даної області немає сенсу.



Рис. 2.15 Блок-схема знаходження сумарної інтенсивності сонячної радіації

Одним з параметрів, що може бути корисним при аналізі отриманих результатів є відношення між загальною площею сонячних панелей і площею, яку займає сонячна електрична станція. Цей параметр дозволяє оцінити кількість

енергії, яку можна отримати з одного квадратного метра сонячної електричної станції.



Рис. 2.16 Блок-схема градієнтного методу сходження з подрібненням кроку

Для знаходження загальної площі сонячних панелей ($S_{\text{с пан}}$) використаємо схему зображену на Рис. 2.11, тоді:

$$S_{\text{с пан}} = a \left(L \frac{b}{d+d'} \right), \quad (2.30)$$

де a , b – відповідно довжина і ширина СЕС. Відношення між загальною площею сонячних панелей і площею сонячної електричної станції можна обчислити за допомогою відношення:

$$k_S = \frac{S_{\text{з пан}}}{S_{\text{сес}}} = \frac{L}{d+d'} = \frac{1}{k \sin \lambda + \cos \lambda}, \quad (2.31)$$

Використовуючи описаний вище метод, знайдено оптимальні просторові параметрів для СЕС, що розташована в Львівській області ($49^{\circ}50'N$ $23^{\circ}50'E$).

Встановлено, що функція мети має два максимуми. Перший максимум знаходиться за умови, що сонячні панелі розташовані горизонтально (кут нахилу 0). В такому випадку відстань між рядами сонячних панелей рівна 0. Другий

максимум знаходиться в $(0.576, 59.92)$. Тобто, $k = 0.576$, $\lambda = 59.92$. В першому випадку середня кількість сонячної радіації падаюча на сонячні панелі, що розташовані на 1 м^2 площі сонячної електричної станції (k_s) становить 142 Вт/м^2 , в другому випадку 147 Вт/м^2 .

Такий результат можна пояснити великою площею поверхні сонячних панелей, а не ефективністю використання сонячних панелей. Так у першому і другому випадку відношення площі поверхні сонячних панелей до площі сонячної електричної станції складає приблизно 1.

Також, з метою збільшення ефективності використання сонячних панелей проведено оптимізацію тільки за k . В даному випадку кут нахил сонячних панелей був фіксований і складав 25° , що є оптимальнішим значенням для весняно-осіннього періоду і для широти, в якій знаходиться Львівська область [94]. На Рис. 2.17 показано залежність між k та потужністю, що припадає на 1 м^2 площі сонячної електричної станції. Оптимальне значення відношення відстань між рядами і висоти сонячних панелей, для даного випадку складає $k = 1.62$, а середня кількість сонячної радіації, що падає на сонячні панелі, що розташовані на 1 м^2 площі сонячної електричної станції становить 68.5 Вт/м^2 , при $k_s = 0.71$.

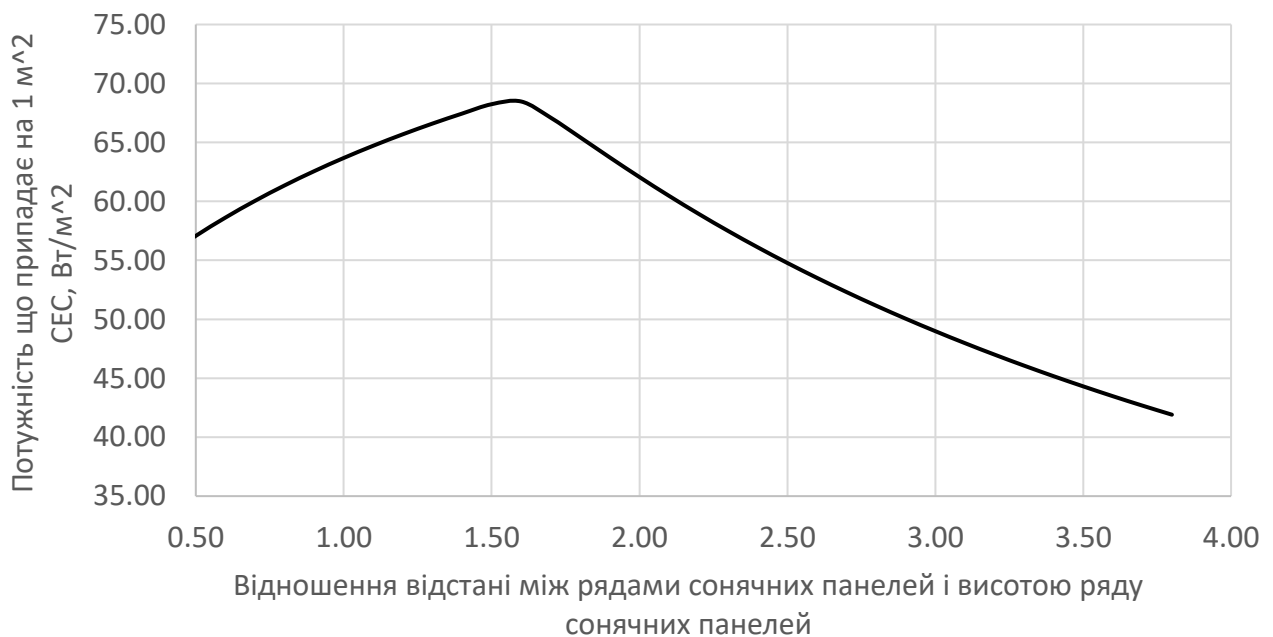


Рис. 2.17 Залежність між потужністю СЕС і геометричними параметрами

Також проведена оптимізація за середньою потужністю 1 м^2 сонячної панелі для фіксованого кута нахилу панелей, що складав 25° . Результати представлені на Рис. 2.18.

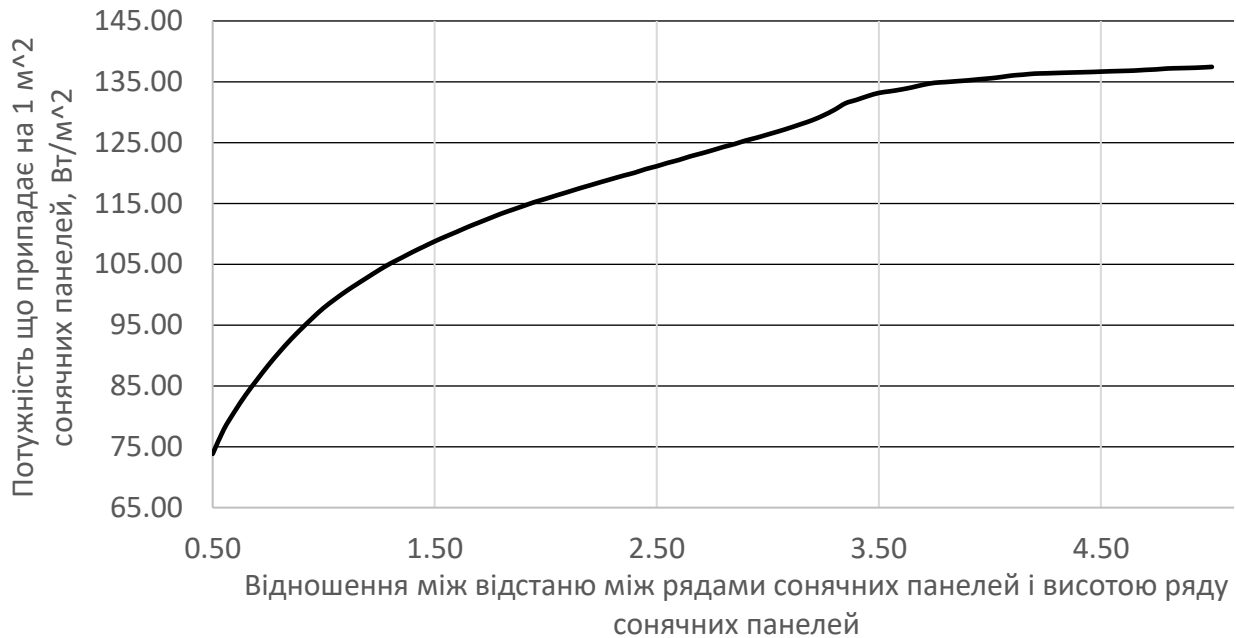


Рис. 2.18 Залежність між потужністю 1 м^2 сонячних панелей і геометричними параметрами

На Рис. 2.18 видно, що при k більше ніж 3.5 середня потужність 1 м^2 сонячної панелі виходить на «плато» в районі 135 Вт/м^2 і при подальшому збільшені 1 м^2 майже не змінюється. Отримана залежність може бути використана на етапі проектування сонячних електричних станцій.

2.4 Розроблення методу короткотермінового прогнозування інтенсивності сонячної радіації

Для короткотермінового прогнозування кількість виробленої електроенергії сонячною електричною станцією необхідно оцінити, яка частина сонячної радіації розсіюється в атмосфері. Параметр, що враховує розсіювання сонячної радіації під час проходження через атмосфери називається коефіцієнтом прозорості атмосфери (P).

Коефіцієнт прозорості атмосфери залежить від пори року, ступеню

покриття неба хмарами, вологості повітря та інших факторів. Наприклад, за умов безхмарного неба до поверхні Землі потрапляє близько 80% сонячної радіації, якщо хмарність становить 5 балів, то цей показник дорівнює 65%, а при 10 балах – близько 20% [95].

У загальному випадку, коефіцієнт прозорості атмосфери можна обчислити за допомогою відношення:

$$P = \frac{I_B}{I_0} \quad (2.32)$$

де m – оптична маса, I_B – вимірювальна інтенсивність сонячної радіації, I_0 – розрахункова інтенсивність сонячної радіації без врахування атмосфери.

На Рис. 2.19 представлено графік вимірювальної інтенсивності сонячної радіації і розрахункової інтенсивності сонячної радіації без врахування атмосфери. На Рис. 2.20 представлено дані про відсоток неба покритий хмарами. Аналізуючи ці два рисунки можна помітити кореляцію між збільшенням розсіювання сонячної радіації в атмосфері (коефіцієнтом прозорості) і відсотком покриття неба хмарами.

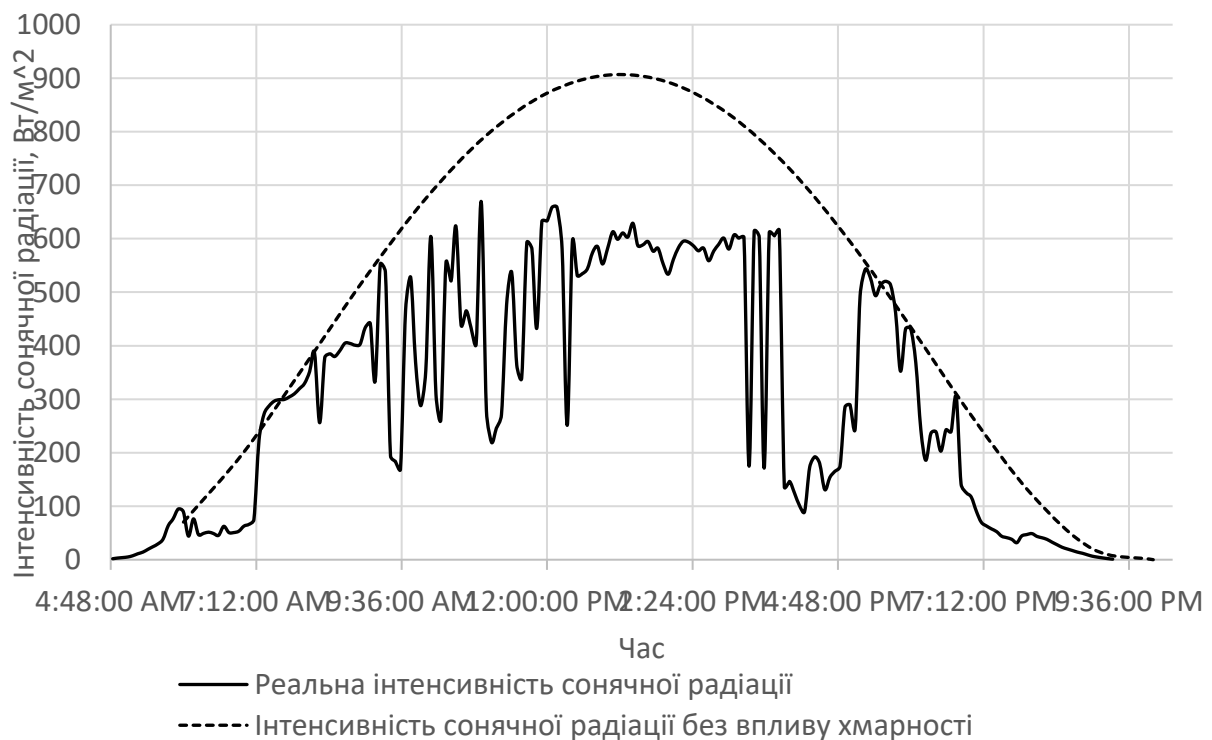


Рис. 2.19 Графік інтенсивності сонячної радіації протягом дня

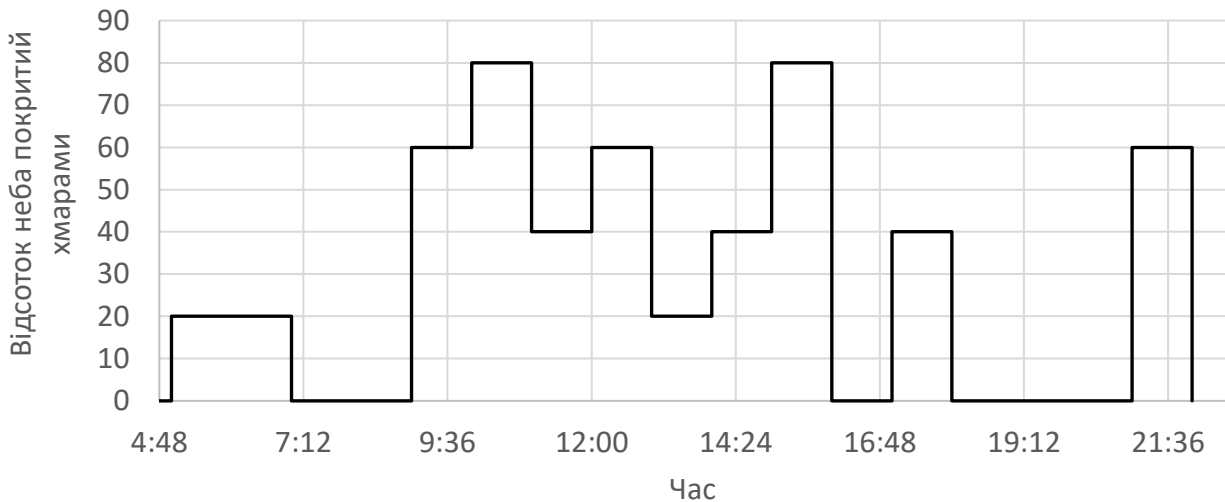


Рис. 2.20 Прогноз відсотка покриття неба хмарами протягом дня

Для короткотермінового прогнозування кількість виробленої електроенергії сонячною електричною станцією розроблено метод, що використовує кореляцію між коефіцієнтом прозорості атмосфери та даними метеопрогнозу. Метод реалізується в два етапи. На першому етапі визначається залежність між коефіцієнтом прозорості атмосфери (P) і відсотком покриття неба хмарами на основі даних інтенсивності сонячної радіації протягом заданого періоду часу $[t_1; t_2]$. На другому етапі прогнозується кількості виробленої електроенергії СЕС для періоду часу $[t_{forecast1}; t_{forecast2}]$ на основі метеопрогнозу. На першому етапі виконуються така послідовність дій:

- Обчислюється інтенсивність сонячної радіації без врахування атмосфери (I_0) з заданою дискретністю, де $t \in [t_1; t_2]$. Дискретність обчислень відповідає дискретності спостережень інтенсивності сонячної радіації (I_B).
- За допомогою виразу (2.32) визначається p для всіх $t \in [t_1; t_2]$ на основі даних вимірювальної інтенсивності сонячної радіації (I_B) і розрахункової інтенсивності сонячної радіації без врахування атмосфери (I_0).
- Отримані значення P групуються за відсотком покриття неба хмарами отриманого з даних спостережень погоди. З метою зменшення впливу

похибки метеопрогноз значенню відсотка покриття неба може бути квантоване, тобто діапазон значень може бути розбитий на скінчену кількість інтервалів.

- Визначається середнє значення P для кожної групи.
- Апроксимується отримана залежність.

Результатом виконання першого етапу є залежність між коефіцієнтом прозорості і відсотком покриття неба хмарами. Приклад отриманої залежності представлений на Рис. 2.21.

На другому етапі виконуються такі дії:

- За допомогою отриманої на першому етапі залежності і метеопрогнозу визначається P для $t_{forecast} \in [t_{forecast1}; t_{forecast2}]$ із заданою дискретністю.
- Розраховуються інтенсивності сонячної радіації без врахування атмосфери ($I_{forecast0}$) для $t_{forecast} \in [t_{forecast1}; t_{forecast2}]$.
- Розраховується очікувана інтенсивності сонячної радіації в моменти часу $t_{forecast} \in [t_{forecast1}; t_{forecast2}]$ (вираз (2.32)).
- Визначається кількість виробленої енергії СЕС в момент часу $t_{forecast} \in [t_{forecast1}; t_{forecast2}]$ за допомогою розробленої моделі перетворення сонячної енергії.
- Визначається сумарна кількості виробленої енергії за період часу $[t_{forecast1}; t_{forecast2}]$.

На рисунку Рис. 2.21 можна помітити, що при зростанні покриття неба хмарами зменшується значення коефіцієнта прозорості атмосфери. Проте, при покритті неба хмарами, що рівне 1, спостерігається аномальне збільшення коефіцієнта прозорості атмосфери. Можна виділити декілька причин аномалій такого роду:

- Неточність прогнозу. Сучасні моделі прогнозування хмарності не дозволяють з абсолютною точністю спрогнозувати відсоток покриття неба хмарами. Звичайна точність таких моделей лежить межах 5-10%

для літнього періоду і 15-20% для зимового;

- Особливості хмарного покриву. Для точного прогнозування коефіцієнта прозорості атмосфери, крім відсотком покриття неба хмарами, необхідно враховувати і такий параметр, як оптична щільність хмар і інші. Відсутність таких параметрів в метеопрогнозі призводить до значних відхилень між реальними і прогнозованими даними;
- Дискретність прогнозу. Прогнозування відбувається з певною частотою, що вносить деяку похибку в результати. В дослідженні використовувалися дані з сервісу visualcrossing.com [96] з частотою в 1 год;

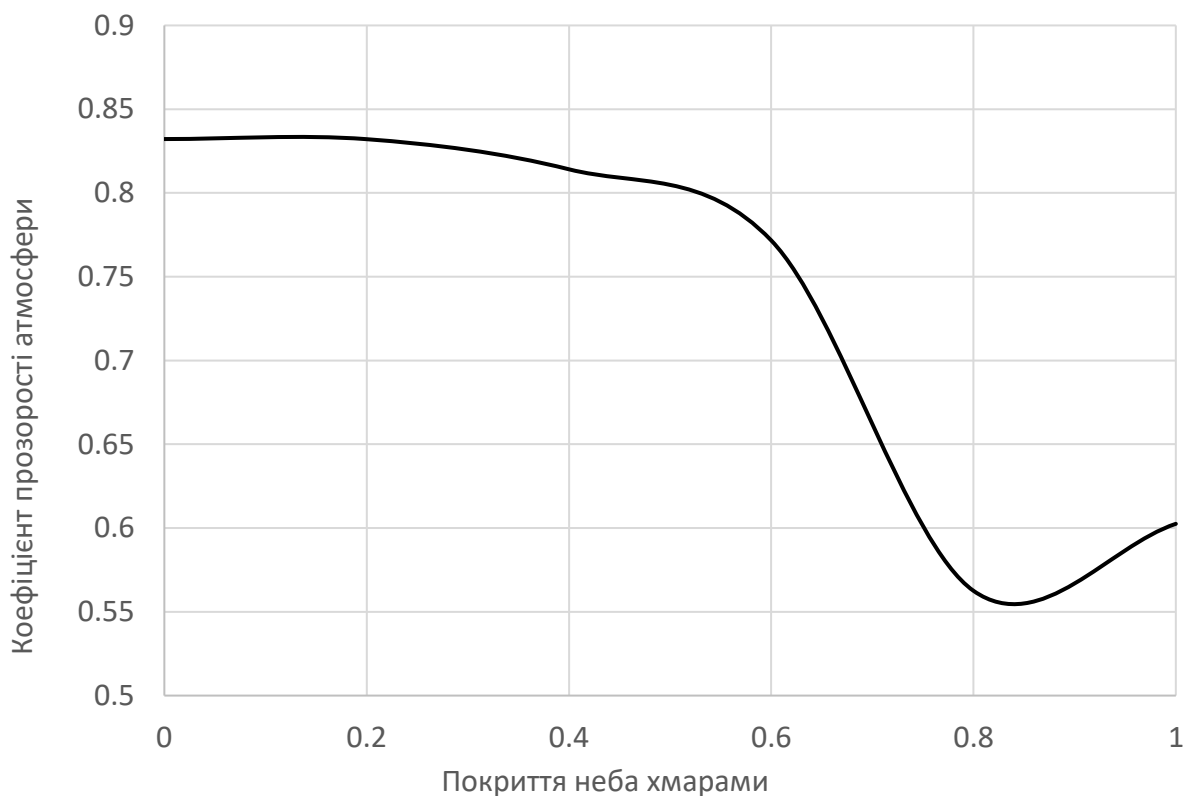


Рис. 2.21 Залежність між коефіцієнтом прозорості і відсотком покриття неба хмарами

На Рис. 2.22 і в Таблиця 2.2 наведено результати використання розробленого методу короткотермінового прогнозування кількості виробленої електроенергії сонячної електричної станції «на добу наперед» протягом 90 днів

літнього періоду.

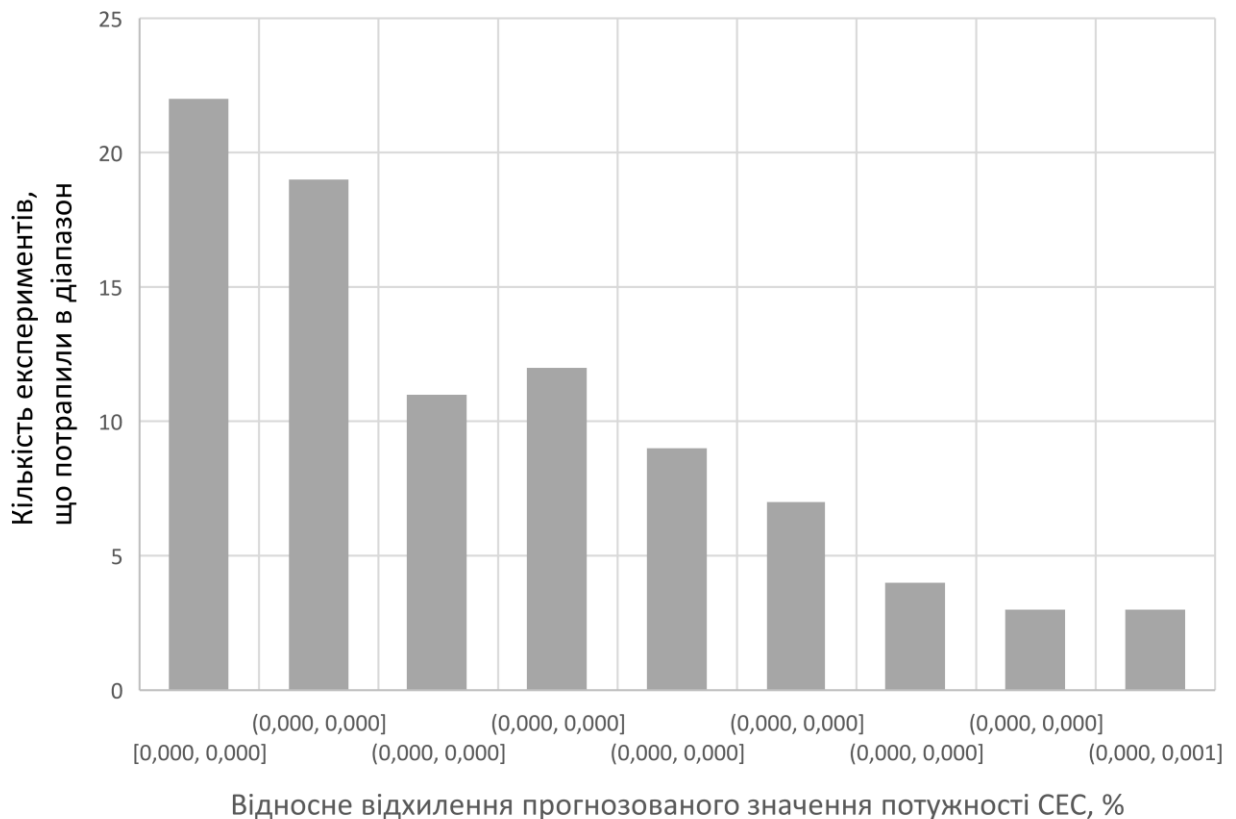


Рис. 2.22 Гістограма відхилення між реальним і прогнозованим значенням потужності СЕС

Таблиця 2.2 Результати прогнозування інтенсивності сонячної радіації

Назва статистичного параметри	Значення
Відношення розкиду відхилень ΔS_{Σ}	[-0,31;0,78]
Середнє лінійне відхилення ΔS_{Σ}	0,2135
Середнє квадратичне відхилення ΔS_{Σ}	0,2201
Дисперсія ΔS_{Σ}	0,0484

На основі отриманих даних можна стверджувати, що в середньому передбачене значення відхиляється від реального на 20%, значення лежать в діапазоні [-0,31;0,78]. В деяких випадках прогнозування перевищує реальне значення на 50% - 60%. Аналіз цих випадків показав, що відхилення між реальними і прогнозованими даними виникає у разі проходження грозового фронту з хмарами з більшою оптичною щільністю. В такому випадку, навіть при однаковому показнику покриття неба хмарами, інтенсивність сонячного

випромінювання, що досягає землі, може сильно варіюватися, що і призводить до значних похибок в прогнозі.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що розроблений метод може бути використаний як безплатна альтернатива іншим методам прогнозування кількості виробленої електроенергії сонячної електричної станції. Проте, точність метод обмежена рядом факторів, таких як: неточність метеопрогнозів; низька дискретність метеопрогнозів; обмежена кількість інформації про хмарність в метеопрогнозі. Для збільшення точності методу, необхідно провести подальші дослідження.

Висновки до розділу 2

У другому розділі досліджено процеси управління енергодинамічними режимами роботи гібридних вітро-сонячних систем електропостачання за наявності акумулюючого елемента (АЕ). Результатом якого є розроблений набір продукційних правил для управління енергодинамічними режимами гібридної системи.

Розроблено модель заряду-розряду АЕ з врахуванням режиму заряду СС/СV. З метою дослідження коректності моделі, проведено порівняльний аналіз її з моделлю на основі еквівалентної схеми. На основі аналізу отриманих результатів, можна зробити висновок, що різниця між максимальною потужністю заряду-розряду для описаних моделей не перевищує 10%, а в середньому становить 3,5%.

Розроблено модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією, яка завдяки врахуванню визначеного коефіцієнта прозорості та просторових параметрів перетворювача, яка забезпечує прогнозування обсягів генерування енергії та формування балансу потужностей.

Розроблено метод короткотермінового прогнозування потужності СЕС. Для роботи розроблений метод використовує метеорологічний прогноз хмарності на добу наперед. Аналіз результатів використання методу показав, що в

середньому передбачене значення інтенсивності сонячної радіації відхиляється від реального на 20%, значення лежать в діапазоні $[-0,31;0,78]$. В деяких випадках прогнозування перевищує реальне значення на 50% - 60%.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ

3.1 Формулювання завдання визначення активного складу вітрових електричних установок

У випадку зміни швидкості вітру, або при отриманні вказівок від диспетчера мережі, виникає ситуація коли необхідно включити/виключити деякі ВЕУ, так щоб найкращим чином забезпечити потреби споживачів. В визначенні оптимального набору ВЕУ і полягає задача визначення активного складу.

Існує декілька підходів до формалізації задачі визначення активного складу ВЕС. Один з найпростіших, це формалізації цієї задачі як задачі пакування рюкзака. В такому випадку, під вагою розуміємо потужність, яку необхідно згенерувати, а під ціною – ефективність кожної ВЕУ. Тобто, для знаходження активного складу ВЕС необхідно знайти такий набір ВЕУ, щоб сумарна потужність ВЕУ набору була менша або рівна ніж потужність, яку треба згенерувати, а сума коефіцієнтів ефективності ВЕУ набору – максимальною. Тобто:

$$b_1 w_1 + \dots + b_n w_n \leq W \quad (3.1)$$

де n – порядковий номер ВЕУ, $b = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ – набір бінарних значень, що показують які ВЕУ включені у набір, (n -а ВЕУ включена в набір якщо $b_n = 1$), $w = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ – набір потужностей ВЕУ, W – потужність, яку треба згенерувати. Цільова функція має вигляд:

$$b_1 c_1 + \dots + b_n c_n \rightarrow \max \quad (3.2)$$

де $c = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ – набір коефіцієнтів ефективності ВЕУ. Коефіцієнт ефективності ВЕУ – це інтегральна величина, що обчислюється на основі технічних параметрів ВЕУ, таких як: показники технічного стану, кількість включень/виключень, кількість виробленої енергії, кількість напрацьованих годин, тощо. Для визначення коефіцієнта ефективності ВЕУ використовується адитивна функція:

$$K_{\Sigma} = a_1 K_1 + \dots + a_j K_j \quad (3.3)$$

де a_j – ваговий коефіцієнт j -го параметра, K_j – нормалізоване значення j -го параметра. Оскільки описані параметри мають різну розмірність, кожен з них нормалізується таким чином щоб, значення лежало в межах $[0;1]$.

Формалізація задачі визначення активного складу ВЕС, як класичну задачу пакування рюкзака, має ряд обмежень. А саме, відповідно до виразу (3.1) сумарна потужність активного складу ВЕС має бути меншою або рівною ніж потужність, яку треба згенерувати, що призводить до складності забезпечити потреби споживачів у всіх випадках. Також, у зв'язку з специфікою цільової функції, найбільш пріоритетними, для включення до активного складу, є ВЕУ для яких співвідношення між ефективністю і потужністю є максимальним. Що призводить до інтенсивнішого використання ВЕУ меншої потужності (за наявності таких).

Інший підхід до формалізації задачі визначення активного складу ВЕС, що вперше описаний в роботі присвяченій модифікованому методу динамічного програмування (МДП) [7], дозволяє усунути обидва недоліка. Головна ідея підходу полягає в зміні обмежень і цільової функції таким чином, щоб мінімізувати небаланс потужності і максимізувати ефективність ВЕС. Цільова функція має вигляд:

$$\Delta P = \left[\sum_{n=1}^N b_n p_n - P \right] \quad (3.4)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{n=1}^N b_n k_{\Sigma n}}{\sum_{n=1}^N b_n} \quad (3.5)$$

$$W(\Delta P, \bar{K}) = a_1 \bar{K} + a_2 (1 - \Delta P) \rightarrow \max \quad (3.6)$$

де b_n – бінарна величина, яка показує включений n -й ВЕУ у набір ($b_n = 1$), чи ні ($b_n = 0$), p_n – потужність n -ї ВЕУ, k_n – коефіцієнт ефективності n -ї ВЕУ, P – потужність, яку необхідно згенерувати, ΔP – значення небалансу потужності, \bar{K}

– коефіцієнт ефективності набору ВЕУ.

3.2 Застосування нейронних мереж для визначення активного складу вітрової електричної станції

Перспективи використання штучних нейронних мереж, для розв'язання задач комбінаторної оптимізації (до яких відноситься і задача визначення активного складу ВЕС) досліджено в роботах [67, 68, 69, 97, 98]. Автори стверджують, що використання сучасних методів машинного навчання (зокрема штучних нейронних мереж) має значні перспективи для розв'язання задача комбінаторної оптимізації.

Практичні результати використання штучних нейронних мереж для розв'язання задачі пакування рюкзака представлені в роботах [97, 98]. Зокрема використані нейронні мережі Хопфілда. Суттєва перевага мереж Хопфілда полягає в тому, що нейрони в цій мережі можуть перебувати тільки у двох станах 0 або 1, що усуває необхідність перетворення вихідних даних в дискретні значення. Проте, мережа Хопфілда може працювати нестабільно для деяких вхідних значень [68].

Також, в роботі [97] показано, що в 8% випадків рекурентні нейронні мережі змогли знайти рішення з більшою сумою вартостей ніж «жадібний» алгоритмом, проте вони значно уступають методу повного перебору.

На підставі аналізу результатів попередніх досліджень обґрунтовано вибір рекурентної нейронної мережі (РНМ) шаруватої структури як інструменту для розв'язання задачі. Для навчання мережі використано метод зворотного поширення помилки. Уточнення ваг зворотного поширення помилки здійснено за допомогою стохастичного градієнтного спуску (SGD).

Метод стохастичного градієнтного спуску [93] - це ітераційний алгоритм, на кожному кроці якого вектор ваг w змінюється в напрямку найбільшого зменшення цільової функції, тобто в протилежному напрямку градієнта. В залежності від природи даних, метод дозволяє задавати швидкість навчання

(*learning rate*) мережі. Якщо задати занадто велике значення параметра швидкість навчання, то існує імовірність що вектор ваг w буде «перескакувати» своє оптимальне значення. При малих значеннях швидкість навчання імовірність «проскочити» оптимум мала, але це вимагає значно більшої кількості обчислень. В роботі [99] показано, що метод стохастичного градієнтного спуску показує кращі результати порівняно з іншими досліджуваними методами, що і зумовило його вибір.

Для обґрунтування конфігурації РНМ, яка б краще вирішувала поставлену задачу, проведено дослідження над трьома типами РНМ з різними парадигмами навчання:

- без вчителя. Відсутність вчителя дозволяє суттєво скоротити час навчання РНМ, проте значним недоліком цього методу є гірші результати порівняно з навчанням із вчителем;
- із вчителем, роль якого виконує метод повного перебору. Використання методу повного перебору значно збільшує час навчання нейронної мережі, а степеневий ріст складності зумовлює складності застосування РНМ у випадку великого числа ВЕУ;
- із вчителем, роль якого виконує модифікований метод динамічного програмування. Використання модифікованого методу динамічного програмування дозволяє скоротити час навчання РНМ порівняно з методом повного перебору, проте цей метод знаходить наближений розв'язок поставленої задачі, на відміну від методу повного перебору;

З метою визначення топології РНМ, досліджено різні комбінації РНМ і способу навчання, що описані вище. Вибрано такі топології:

- РНМ без прихованих шарів;
- РНМ з одним прихованим шаром;
- РНМ з двома прихованими шарами;

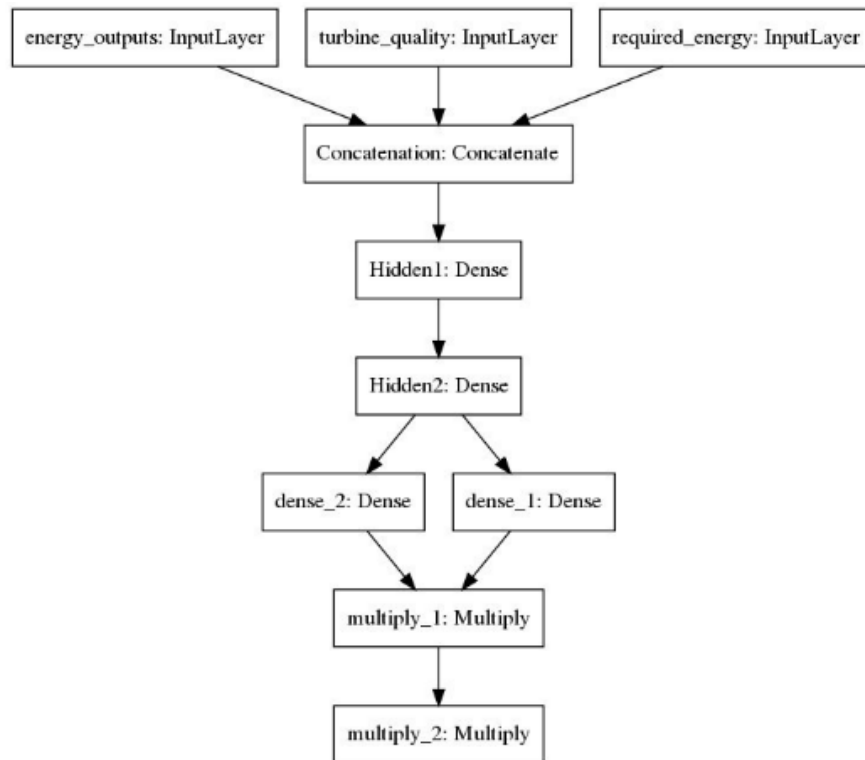


Рис. 3.1 Топології РНМ з двома прихованими шарами

На Рис. 3.1 наведена топологія РНМ з двома прихованими шарами. На вхідний шар мережі передаються 3 масиви даних:

- миттєві потужності ВЕУ;
- коефіцієнти ефективності ВЕУ;
- графік навантаження;

Наступний рівень – це рівень об’єднання вхідних даних. Далі, залежно від топології в мережі присутні, або відсутні приховані шарами. Для вхідного і прихованих шарів використано функцію активації ReLU (зрізаний лінійний вузол) [100]. Функція описується таким виразом:

$$f(x) = x^+ = \max(0, x) \quad (3.7)$$

де x – вхідне значення нейрона. Як гладке наближення (функція, що має неперервну похідну на всій області визначення) до ReLU використовується Softplus-функція:

$$f(x) = \log(1 + \exp x) \quad (3.8)$$

Функції активації ReLU і Softplus-функції представлені на Рис. 3.2.

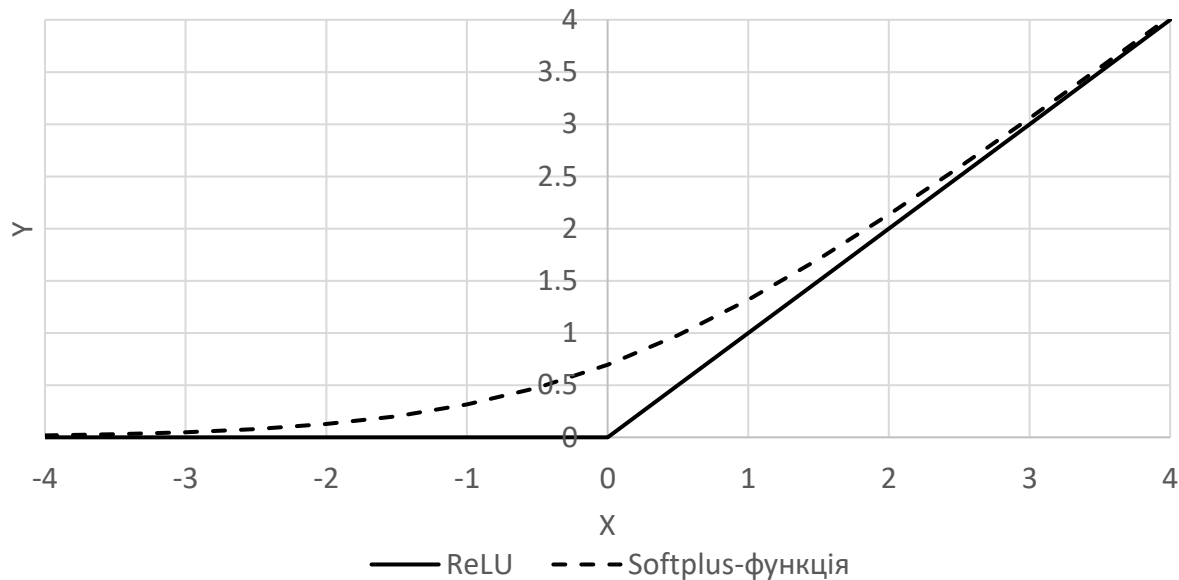


Рис. 3.2 Графік функцій активації ReLU і Softplus-функції

Останні два рівні РНМ додано для отримання дискретних результатів, що є однією з вимог для знаходження активного складу ВЕС. Як функції активації використано сигмоїду (sigmoid) і гіперболічний тангенс (tanh) [101].

$$S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} = \frac{e^x}{e^x+1} \quad (3.9)$$

$$\tanh(x) = \frac{\text{sh}(x)}{\text{ch}(x)} \quad (3.10)$$

Графіки цих функцій представлені на Рис. 3.3. Останнім є вихідний рівень.

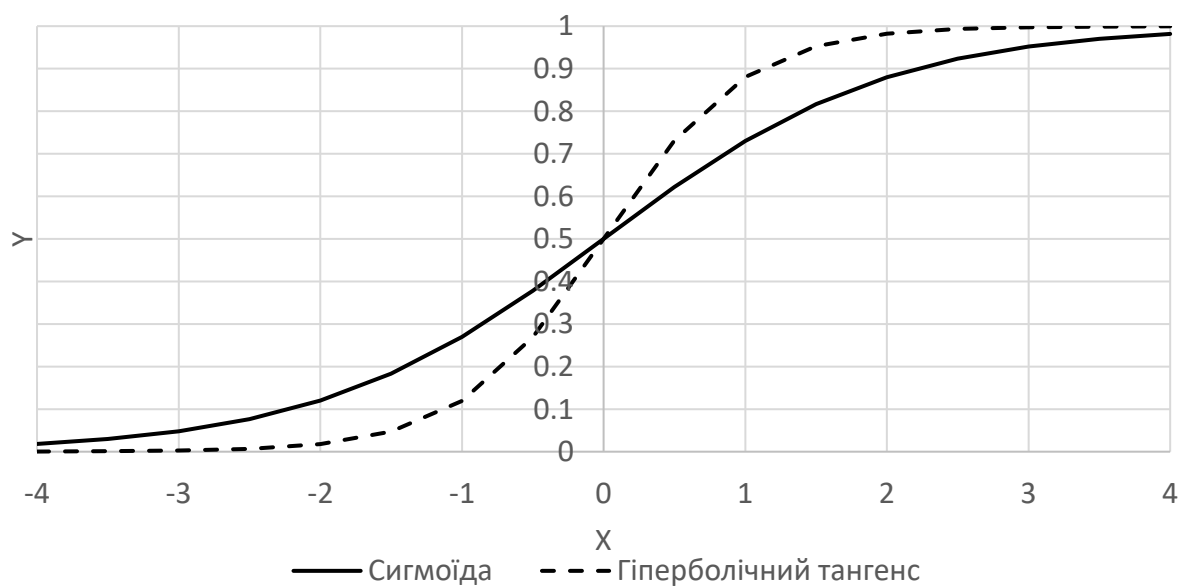


Рис. 3.3 Графік функцій активації сигмоїда і гіперболічного тангенса

Для навчання РНМ використано навчальну вибірку, що складається з 400 елементів, і тестову вибірку з 100 елементів. Результати дослідження представлені в табл. 3.1-3.3. Середнє навантаження споживачів складає 5 МВт. Навчання РНМ відбувалося протягом 4096 епох, із замірами середнього відхилення потужності через кожних 512, для перевірки збіжності РНМ.

Таблиця 3.1 РНМ без вчителя

Топологія РНМ	РНМ без прихованих шарів	РНМ з одним прихованим шаром	РНМ з двома прихованими шарами
Параметри розв'язків			
Розкид відхилень ΔP (кВт)	[-3515;3001]	[-1311;3001]	[-1816;3837]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності (%)	[-70;60]	[-26,2;60]	[-36;76]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,5958	0,6261	0,6007
Середнє відхилення ΔP (кВт)	1328,6	558,9	1270,1
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	26,5	11,2	25,4
Дисперсія відхилення ΔP	$24,8 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$24,3 \cdot 10^5$
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	31,4	16,8	31,1
Швидкість одного розв'язання (с)	$6,86 \cdot 10^{-3}$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-3}$

ВЕС складається з 20 ВЕУ, з них 10 ВЕУ типу ENERCON-53 з номінальна потужністю 800 кВт і 10 ВЕУ типу ENERCON E-44/900 з номінальна потужністю 900 кВт.

Таблиця 3.2 РНМ з вчителем, роль якого виконує метод повного перебору

Топологія РНМ	РНМ без прихованих шарів	РНМ з одним прихованим шаром	РНМ з двома прихованими шарами
Параметри розв'язків			
Розкид відхилень ΔP (кВт)	[-1308;1994]	[-1099;1194]	[2023;3552]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності (%)	[-70;39,8]	[-22;23,8]	[-40,5;71]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,5996	0,6266	0,6016
Середнє відхилення ΔP (кВт)	1037,4	405,4	1076,1
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	20,7	8,1	21,5
Дисперсія відхилення ΔP	$19,4 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$17,9 \cdot 10^5$
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	27,8	9,8	26,7
Швидкість одного розв'язання (с)	$6,78 \cdot 10^{-3}$	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3.3 РНМ з вчителем, роль якого виконує МДП

Топологія РНМ	РНМ без прихованих шарів	РНМ з одним прихованим шаром	РНМ з двома прихованими шарами
Параметри розв'язків			
Розкид відхилень ΔP (кВт)	[-1308;1994]	[-1099;1194]	[-2023;3552]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності (%)	[-70;39,8]	[-22;23,8]	[-40,5;71]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,5991	0,6261	0,6012
Середнє відхилення ΔP (кВт)	1066,6	407,9	1080,8
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	21,3	08,1	21,6
Дисперсія відхилення ΔP	$19,6 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$18 \cdot 10^5$
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	28,3	09,7	26,8
Швидкість одного розв'язання (с)	$6,86 \cdot 10^{-3}$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-3}$

Використання великої кількості прихованих шарів може зумовити запам'ятовування моделлю навчального набору даних і при зустрічі з тестовою вибіркою мережа не показує стабільних рішень. В Таблиця 3.1 можна помітити, що РНМ з двома прихованими шарами суттєво уступає РНМ з одним прихованим шаром.

На основі аналізу отриманих результатів можна стверджувати, що РНМ з одним прихованим шаром показала кращий результат серед досліджуваних топологій. РНМ з вчителем, роль якого виконує метод повного перебору і МДП показали майже однакові результати. Проте, оскільки для навчання РНМ за допомогою методу повного перебору необхідно в декілька десятків раз більше часу (навчання займає майже 6 годин) ніж за допомогою МДП (навчання займає близько десяти хвилин) і оскільки використання методу повного перебору не дає суттєвий переваг, подальші дослідження проведені для РНМ без вчителя з одним прихованим шаром і для РНМ із вчителем, роль якого виконує МДП, з одним прихованим шаром.

Для дослідження переваг і недоліків використання обґрунтованої конфігурації РНМ порівняно з іншими описаними методами розв'язання задачі проведено по 500 експериментів для кожного з них. Середнє навантаження споживачів прийнято рівним 50 МВт. Досліджувана ВЕС складається з 210 ВЕУ,

з них 105 ВЕУ типу ENERCON-53 і 105 ВЕУ типу ENERCON E-44/900. Потужність кожної ВЕУ визначається з врахуванням швидкості вітру відповідно до тактико-технічних характеристик. Швидкість вітру змінювали в діапазоні [5;15] м/с. Навчання РНМ відбувалося протягом 10000 епох. Для навчання РНМ використано навчальну вибірку, що складається з 2000 елементів, і тестову вибірку з 500 елементів. Статистичний аналіз отриманих результатів експериментів подано в Таблиця 3.4.

Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що серед досліджуваних конфігурацій РНМ, найкращі результати показала РНМ з вчителем, роль якого виконує МДП. Середнє відхилення цього метода менше в 1,6 рази в ніж для РНМ без вчителя, а дисперсія менша 2,2 рази. Серед інших методів кращий результат отримано модифікованим методом динамічного програмування (МДП).

Таблиця 3.4 Порівняння ефективності алгоритмів визначення активного складу

Назва методу	РНМ без вчителя	РНМ з вчителя	Модифікований метод динамічного програмування
Параметри розв'язків			
Розкид відхилень ΔP (кВт)	[-4472;3001]	[-2327;4740]	[-209; 84,7]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності (%)	[-9;6]	[-4,6;9,5]	[-4,2;1,7]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,6265	0,6273	0,6418
Середнє відхилення ΔP (кВт)	1365,5	861,3	28,79
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	2,73	1,72	0,05
Дисперсія відхилення ΔP	2648034	1202552	1658
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	3,254	2,193	0,081
Швидкість одного розв'язання (с)	0,04	0,04	3,4

Порівнюючи результати застосування РНМ з вчителем і МДП, можна зробити висновок, що використання РНМ для розв'язання задачі знаходження оптимального складу ВЕС має як переваги так і недоліки. Суттєвим недоліком є необхідність навчання мережі і значно менша точність розв'язання ніж у інших досліджуваних методах. Так, середнім зазначенням різниці між навантаженням,

яке необхідно забезпечити, та потужністю активного складу ВЕС для МДП менше в 30 раз ніж при використанні РНМ з вчителем. Проте, використання РНМ інших типів (наприклад нейронних мереж Гопфілда, або інших), збільшення розміру навчальної вибірки і кількості епох, протягом якого відбувається навчання, може збільшити точність. До переваг можна віднести, високу швидкість розв'язання, що дозволяє застосовувати РНМ в випадках, коли швидкість роботи є визначальним показником (в екстремальних умовах, при значних кількостях ВЕУ, у випадку отримання вказівок від диспетчера мережі). Швидкість роботи РНМ з вчителем в 85 раз більша ніж в МДП. Середнє значення коефіцієнта ефективності набору ВЕУ дещо вище для МДП ніж для РНМ з вчителем.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та реалізації ефективних систем підтримки прийняття рішень для управління енергетичними потоками в комплексних системах електропостачання за наявності ВЕС.

3.3 Застосування генетичних алгоритмів для визначення активного складу вітрової електричної станції

Для розв'язання задач комбінаторної оптимізації, до цього класу відноситься задача визначення активного складу ВЕУ, можна використати генетичні алгоритми. Дослідження на цю тему проведено в роботах [64, 65, 66, 102]. Дослідження показали, що класичні ГА є ефективним методом розв'язанням комбінаторних задач (задачі комівояжера і інших). Проте, використання ГА ускладнюється тим фактом, що не існує аналітичного способу визначення оптимальної конфігурації ГА (методу селекції, оператора схрещення, оператор мутації, розміру популяції, кількість, тощо). Параметри можуть сильно варіюються в залежності від особливостей поставленої задачі.

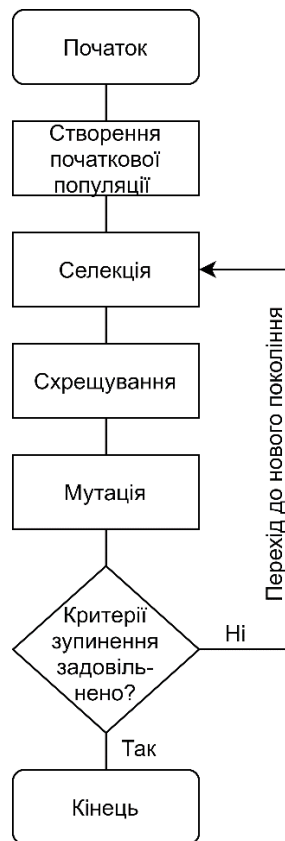


Рис. 3.4 Блок-схема роботи класичного генетичного алгоритму

Класичні ГА складається з трьох основних елементів: метод селекції, оператор схрещування, оператор мутації. На Рис. 3.4 представлено схематичне зображення класичного ГА.

Метод селекції – це метод, який відбирає хромосоми до наступного покоління. Існує надзвичайно велика кількість різноманітних методів селекції, серед всього різноманіття можна виділити, такі як:

Селектор Больцмана, (Boltzmann selector) – при використанні цього методу ймовірність відбору хромосоми ($P(x)$) визначається, як [103]:

$$P(x) = \frac{e^{-bF(x)}}{\sum_{i=1}^N e^{-bF(x)}} \quad (3.11)$$

де N – загальна кількість хромосом, b – параметр, який відповідає за інтенсивність відбору, $F(x)$ – функція пристосованості. Позитивні значення b збільшують ймовірність відбору хромосоми з високими показниками придатності. Негативні значення b збільшують ймовірність відбору хромосоми з

низькими показниками придатності. Якщо, b дорівнює нулю ймовірність вибору всіх фенотипів однакова.

Лінійно ранговий селектор (Linear rank selector) – при використанні цього селектора хромосоми сортуються за показником придатності. Рейтинг N присвоюється найкращому, а рейтинг 1 найгіршому. Ймовірність відбору хромосоми присвоюється особам відповідно до їхнього рангу [104]:

$$P(x) = \frac{1}{N} \left(\eta^- + (\eta^+ + \eta^-) \frac{i-1}{N-1} \right) \quad (3.12)$$

$$\eta^+ = 2 - \eta^-, \eta^- \geq 0 \quad (3.13)$$

де i – рейтинг i -ї хромосоми, η^+ , η^- – коефіцієнти селекції.

Експоненціально ранговий селектор (Exponential rank selector) – на відміну від лінійно рангового селектора, ймовірність відбору хромосоми визначається за допомогою експоненціальної функції:

$$P(x) = (c - 1) \frac{c^{i-1}}{c^{N-1}}, c \in [0;1) \quad (3.14)$$

де c – коефіцієнт відбору. Невелике значення c збільшує ймовірність відбору найкращих фенотипів. Якщо c встановлено рівним нулю, ймовірність відбору найкращого фенотипу рівна одиниці. Ймовірність відбору всіх інших фенотипів дорівнює нулю.

Монте-Карло селектор (Monte-Carlo selector) – цей селектор вибирає хромосоми з популяції випадковим чином. Його можна використовувати для вимірювання ефективності інших селекторів.

Відбір за методом рулетки (Roulette wheel selector) – ймовірність вибору хромосоми, цим селектором, прямо пропорційна значенню функції пристосованості, тобто:

$$P(x) = \frac{F(x)}{\sum_{i=1}^N F(i)} \quad (3.15)$$

де $F(x)$ – значення функції пристосованості для x -ї хромосоми.

Стохастичний універсальний селектор (Stochastic universal selector) – цей селектор дозволяє мінімізувати випадкові коливання, оскільки використовуються тільки одне випадкове число, на відміну від K чисел в відборі за методом рулетки. Уявимо рулетку, на якій розміщено K точок, таким чином, щоб вони ділили рулетку на рівні частини. В такому випадку, необхідно знайти тільки одну точку (зсув колеса відносно початкової точки), а інші будуть визначені автоматично [105].

Турнірний селектор (Tournament selector) – селектор вибирає s хромосом для турніру. Хромосома виграє турнір лише у тому випадку, якщо її придатність перевищує придатність інших учасників ($s-1$). Найгірша хромосома ніколи не виживає, а найкраща хромосома виграє у всіх турнірах, в яких вона бере участь. Тиск відбору можна змінювати, змінюючи розмір турніру.

Відбір зрізом (Truncation selector) – при використанні цього селектора хромосоми сортуються за показником придатності. Хромосоми, що знаходяться в кінці списку відсікаються. Відсоток хромосом, які необхідно відсікти, задаються через спеціальним параметром.

Оператор схрещування – це оператор, що дозволяє створити дві зовсім нові хромосоми (нащадки) шляхом комбінування генів пари батьків. В класичних ГА оператор схрещування відіграє надзвичайно важливу роль, на відміну від мутації, що використовується тільки інколи. Серед методів схрещування найпоширенішими є такі методи:

Одно-точкове схрещування (Single point crossover) – випадковим чином визначається точка всередині хромосоми (точка розриву), в якій обидві хромосоми діляться на дві частини і обмінюються ними. Принцип роботи одно-точкового схрещування проілюстрований на Рис. 3.5.

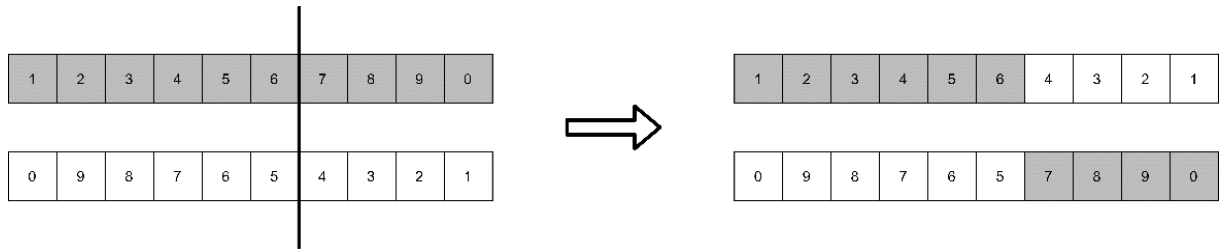


Рис. 3.5 Принцип роботи одно-точкового схрещування

Багато-точкове схрещування (Multi point crossover) – на відміну від одно-точкового схрещування, багато-точкове схрещування дозволяє задавати кількість точок розриву. Якщо, задано одну точку розриву, то цей оператор поводитья як одно-точкове схрещування. На Рис. 3.6 зображено принцип роботи багато-точкового схрещування.

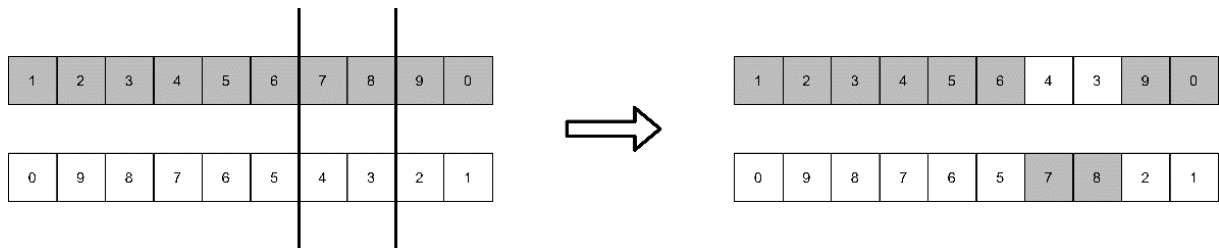


Рис. 3.6 Принцип роботи багато-точкового схрещування

Однорідне схрещування (Uniform crossover) – цей оператор схрещування замінює окремі гени між двома хромосомами, а не цілі діапазонами, як при одно-та багато-точковому схрещуванні.

Частково-узгоджене схрещування (Partially matched crossover, PMC) – гарантує, що всі гени зустрічаються рівно один раз в кожній хромосомі. Жоден ген не буде дублюється цим методом схрещування. Дана особливість може бути корисною для вирішення задач, для яких значення функції пристосованості залежить від упорядкування генів у хромосомі (задача комівояжера і інші) [106].

Оператор мутації – це ще один з метод рекомбінації генів. На відміну від схрещування, мутація не комбінує вже існуючі хромосоми, а випадково змінює один чи декілька генів в хромосомі. Навіть якщо схрещування відіграє значно більшу роль в пошуку хромосоми з найвищим значенням функції пристосованості, мутація може відігравати важливу роль для забезпечення

різноманітності, яке потрібно для схрещування. Серед оператор мутації можна виділити такі [107]:

Однорідний мутатор (Uniform mutator) – це один з найпростіших операторів мутації, який за законом рівномірного розподілу визначає нове значення гена.

Мутація заміною (Swar mutator) – особливість, цього оператора мутації в тому, що він змінює порядок генів в хромосомі, а не значенні самих генів. Як і РМС, цей оператор мутації також може бути використаний для вирішення задач, для яких значення функції пристосованості залежить від упорядкування генів у хромосомі.

Для обґрунтування конфігурації ГА, яка б краще вирішувала задачу знаходження активного складу ВЕС, проведено 500 експериментів для комбінацій описаних вище методів селекції і операторів схрещування (далі комбінація). Хромосома складається з N генів, де N – загальна кількість ВЕУ. Кожен ген може приймати два значення 1 або 0, що відповідно позначає включена ВЕУ в активний склад ВЕС або ні. Як функція пристосованості використовується вираз (3.6).

Розмір популяції становить 100 хромосом, а кількість поколінь обмежена 50. Ці параметри визначенні експериментальним шляхом, таким чином щоб жодна з комбінації не могла знайти оптимальне рішення, що дозволило оцінити їх ефективність.

Оцінка ефективності (K_{com}) комбінації методу селекції і оператора схрещування виконується за середнім значенням функції пристосованості для хромосоми з найвищим значенням цієї функції в останньому поколінні. Тобто:

$$K_{com} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \max(F(x)) \quad (3.16)$$

де M – кількість експериментів, $F(x)$ – значення функції пристосованості. Середнє навантаження споживачів прийнято рівним 50 МВт. Досліджувана ВЕС складається з 210 ВЕУ, з них 105 ВЕУ типу ENERCON-53 і 105 ВЕУ типу

ENERCON E-44/900. Потужність кожної ВЕУ визначається з врахуванням швидкості вітру відповідно до тактико-технічних характеристик. Швидкість вітру змінювали в діапазоні [5;15] м/с. В Таблиця 3.5 представлено найкращі значення функції пристосованості для комбінації, які вдалося отримати при різних значеннях вхідних параметрів для методу секції і оператора схрещування. Для забезпечення більшої рельєфності даних, дані в Таблиця 3.5 нормалізовано таким чином, щоб значення були в межах [0;1], де 0 це комбінація з найменшим значенням функції пристосованості, а 1 з найбільшим. Нормалізація виконано за допомогою виразу:

$$f_{\text{нор}} = \frac{f - f_{\text{мін}}}{f_{\text{макс}} - f_{\text{мін}}} \quad (3.17)$$

де $f_{\text{нор}}$ – нормалізоване значення функції пристосованості, f – не нормалізоване значення функції пристосованості, $f_{\text{мін}}$ – найменше значення функції пристосованості серед комбінацій, $f_{\text{макс}}$ – найбільше значення функції пристосованості серед комбінацій. Комбінація одно-точкового схрещування і Монте-Карло селектора показала найгірший результат серед досліджуваних комбінацій. Значення функції пристосованості для цієї комбінації становить 0.8055. Найкращий результат показала комбінація однорідного схрещування і лінійно рангового селектора зі значенням функції пристосованості 0.8613.

Таблиця 3.5 Порівняння ефективності комбінації методів селекції і операторів схрещування

Методи селекції \ Оператори схрещування	Одно-точкове схрещування	Багато-точкове схрещування	Однорідне схрещування
Селектор Больцмана	0,81	0,95	0,94
Лінійно ранговий селектор	0,85	0,94	1,00
Експоненціально ранговий селектор	0,64	0,78	0,87
Монте-Карло селектор	0,00	0,02	0,03
Відбір за методом рулетки	0,45	0,51	0,53
Стохастичний універсальний селектор	0,38	0,46	0,52
Турнірний селектор	0,84	0,98	0,99
Відбір зрізом	0,51	0,76	0,79

Комбінації з РМС не наведені в Таблиця 3.5, оскільки в ході експериментів встановлено, що особливості роботи РМС призводять до суттєвих часових

затримок для описаних вище умов. Часові затримки значно ускладнюють використання цього оператора на практиці для розв'язання задачі знаходження активного складу ВЕС.

Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що багато-точкове схрещування і однорідне схрещування показали дещо кращий результат ніж одно-точкове схрещування. Проте, різниця між багато-точковим схрещування і однорідним схрещуванням є незначною. Набагато більший вплив на значення функції ефективності показав метод селекції. Так, функції ефективності при використанні лінійно рангового селектора і турнірного селектора на 6.9 % більша, ніж при використанні Монте-Карло селектора. Подальші дослідження проведено для двох комбінацій: лінійно ранговий селектор з коефіцієнтом селекції (η^+) рівним 0.7-0.8 і однорідним схрещуванням з ймовірністю рекомбінації хромосоми 0.75-0.85 і ймовірністю заміни гена 0.75-0.85 (далі комбінація 1); турнірний селектор з розміром турніру в 3-5 і однорідним схрещуванням з ідентичними параметрами (далі комбінація 2). Ці дві комбінації показали найкращий результат на попередньому етапі дослідження.

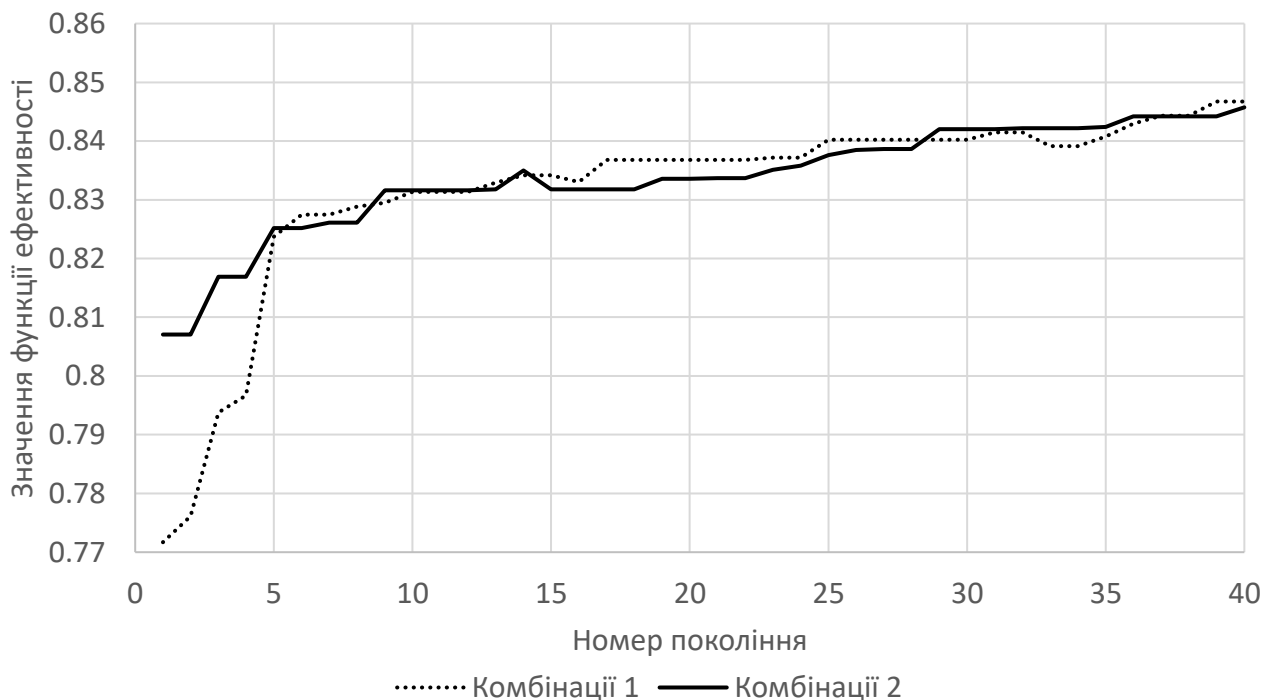


Рис. 3.7 Залежність між найкращим значенням функції ефективності в поколінні і номером поколінь

На Рис. 3.7 представлено залежність між найкращим значенням функції ефективності в поколінні і номером поколінь для комбінації 1 і 2 для одного з експериментів.

На другому етапі, для покращення отриманих результатів, проведено додаткові експерименти з описаними вище операторами мутації. Експерименти проведені за ідентичних умов. В Таблиця 3.6 представлені дані, що показують зміну значення функції ефективності при використанні оператора мутації порівняно з значеннями отриманими без його використання.

Таблиця 3.6 Порівняння ефективності операторів мутації

Комбінація \ Оператор мутації	Однорідний мутатор	Мутація заміною
Комбінація 1	-0.20%	0%
Комбінація 2	-0.10%	-0.08%

На основі отриманих значень не можна однозначно стверджувати, що використання оператора мутації покращує або погіршує ефективність розв'язання задачі знаходження активного складу ВЕС. Оскільки, отримані результати знаходяться на межі статистичної похибки.

На третьому етапі, для дослідження переваг і недоліків використання обґрунтованих конфігурації ГА порівняно з описаними методами розв'язання задачі проведено по 500 експериментів для деяких відомих методів знаходження активного складу ВЕС при ідентичних умовах. Зупинка ГА виконується якщо протягом останніх 50 не вдалося покращити результат. А, розмір популяції ГА збільшено до 600 хромосом. Експериментальним шляхом становлено, що при фіксованому часі такий розмір популяції дозволяє досягти більшого значення функції пристосованості. На Рис. 3.8 представлена залежність між розміром популяції і значенням функції пристосованості.

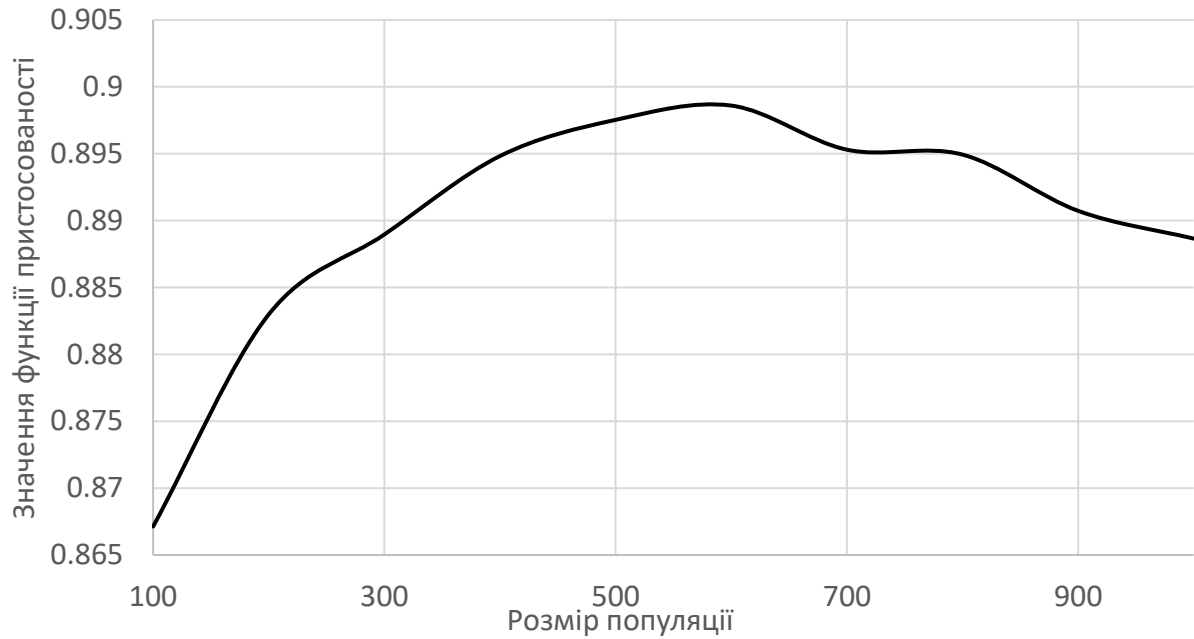


Рис. 3.8 Залежність між розміром популяції і значенням функції пристосованості

На Рис. 3.9 представлено залежність між найкращим значенням функції пристосованості в поколінні і номером поколінь для комбінації 1 і 2 для одного з експериментів. Статистичний аналіз результатів отриманих різними методами представлено в Таблиця 3.7.

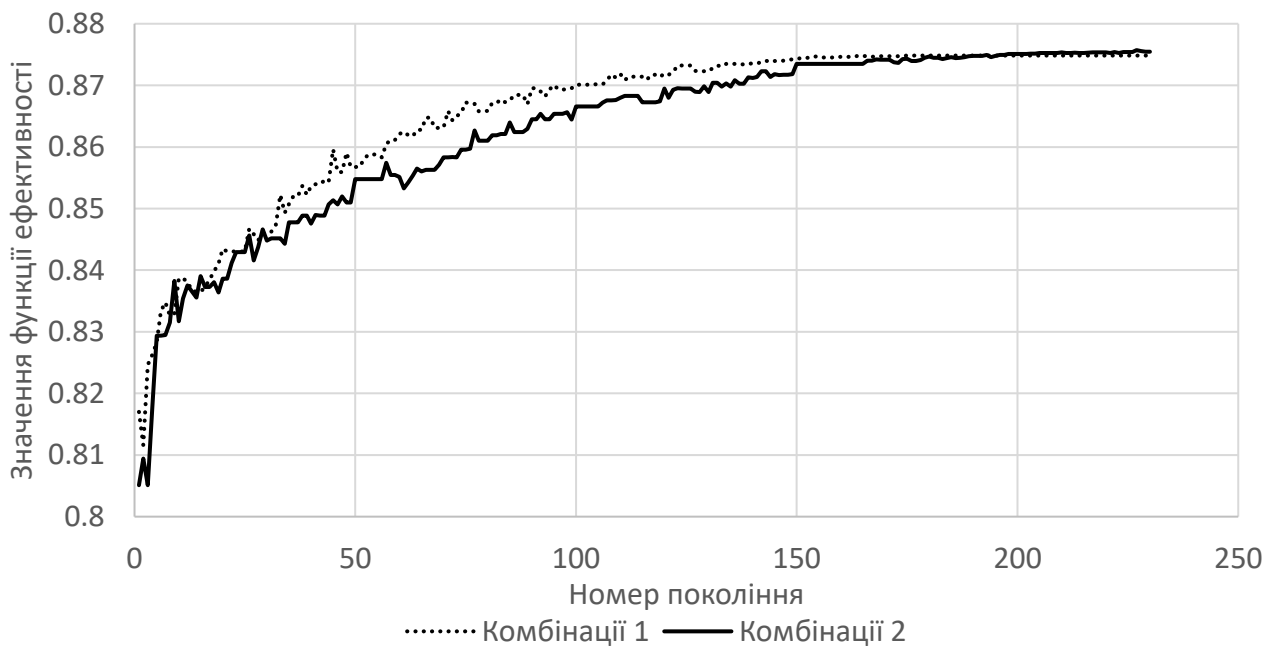


Рис. 3.9 Залежність між найкращим значенням функції пристосованості в поколінні і номером поколінь

Таблиця 3.7 Порівняння ефективності алгоритмів визначення активного складу ВЕС

Назва методу	Модифікований метод динамічного програмування (МДП)	Штучна нейрона мережа (РНМ)	ГА: комбінація 1	ГА: комбінація 2
Параметри розв'язків				
Розкид відхилень ΔP (кВт)	[-209; 84,7]	[-2327; 4740]	[-249; 97]	[-226; 91]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності	[-0.42; 0.17]	[-4.6; 9.5]	[-0.49; 0.2]	[-0.45; 0.18]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0.6418	0.6273	0.6267	0.6268
Середнє відхилення ΔP (кВт)	28.79	861.30	33.79	33.68
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	0.057	1.722	0.067	0.067
Дисперсія відхилення ΔP	1658	1202552	1753	1703
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	0.081	2.193	0.083	0.082
Швидкість одного розв'язання (с)	3.4	0.04	0.9	0.9

Аналізуючи результати першого етапу дослідження, можна стверджувати, що серед досліджуваних комбінацій метода селекції і оператора схрещування, найкращі результати показали дві комбінації:

- лінійно ранговий селектор з коефіцієнтом селекції η^+ рівний 0.7-0.8 і однорідним схрещування з ймовірністю рекомбінації хромосоми близько 0.75-0.85 і ймовірністю заміни гена близько 0.75-0.85 (комбінація 1);
- турнірний селектора з розміром турніру в 3-5 і однорідним схрещуванням з ідентичними параметрами (комбінація 2).

Значення функції ефективності для комбінація 1 і 2 знаходяться майже на одному рівня, 0.86139 і 0.86107 відповідно. Проведені експерименти з операторами мутації показали, що значення функції пристосованості для комбінації 1 і 2 з використанням досліджуваних операторів мутації і без знаходиться в межах статистичної помилки.

Порівнюючи результати застосування ГА і інших методів, можна зробити висновок, що використання ГА для розв'язання задачі знаходження оптимального складу ВЕС – є перспективним напрямком. ГА показали дещо більше середнє відхилення потужності ніж МДП. Тобто, середнім зазначенням

різниці між навантаженням, яке необхідно забезпечити, та потужністю активного складу ВЕС для ГА більше на 15% ніж для МДП. Інші параметри знаходяться на майже одному рівні з МДП. Одна з особливостей ГА – це відносно висока швидкість розв’язання задачі, що в 3.6 рази більша порівняно з показниками МДН, проте менша в 22 рази ніж для РНМ. Достатньо висока точність і висока швидкість, робить ГА гарною альтернативою МДП у випадку, коли швидкість роботи є важливим показником (в екстремальних умовах, при отриманні вказівок від диспетчера мережі).

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та реалізації ефективних систем підтримки прийняття рішень для управління енергетичними потоками в комплексних системах електропостачання за наявності ВЕС.

3.4 Дослідження впливу енергетичної ємності акумулюючого елемента на розмір небалансу потужностей

З метою більш глибокого дослідження впливу акумулюючого елемента (АЕ) на перебіг енергодинамічних процесів проведено дослідження для варіанту автономної вітрової електричної станції (ВЕС) і гібридної вітро-сонячної системи електропостачання (ГВССЕ).

Для варіанту автономної вітрової електричної станції проведено комп’ютерне моделювання режимів роботи з трьома різними моделями акумулюючого елемента, а саме: модель без обмежень на потужність заряду/розряду; розроблена модель, що описана в розділі 2.2; еквівалентна схема акумулюючого елемента, що описана в роботах [83, 84]. Комп’ютерне моделювання проводилося протягом 50 годин для ВЕС, що складається з 40 ВЕУ моделі V52/850, при енергетичній ємності АЕ що починаючи з 0 МВт*год до 11 МВт*год і збільшується з кроком 1 МВт*год, з ККД акумулюючого елемента 95%. Всі значення енергетичної ємності АЕ подано в позасистемних одиниця МВт*год. Середнє навантаження споживачів прийнято на рівні 10 МВт.

Дослідження проведено для трьох методів визначення активного складу ВЕС: модифікації динамічного програмування; генетичних алгоритмів; штучних нейронних мереж.

На основі отриманих статистичних даних встановлена залежність між енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності при використанні модифікації динамічного програмування. Отримана залежність представлена на Рис. 3.10. А також, встановлена залежність між енергетичною ємністю АЕ і дисперсія середнього відхилення потужності (Рис. 3.11).

Використовуючи розроблену модель проведено моделювання роботи ВЕС для різних значень навантаження. Результати моделювання подані на Рис. 3.12 і Рис. 3.13.

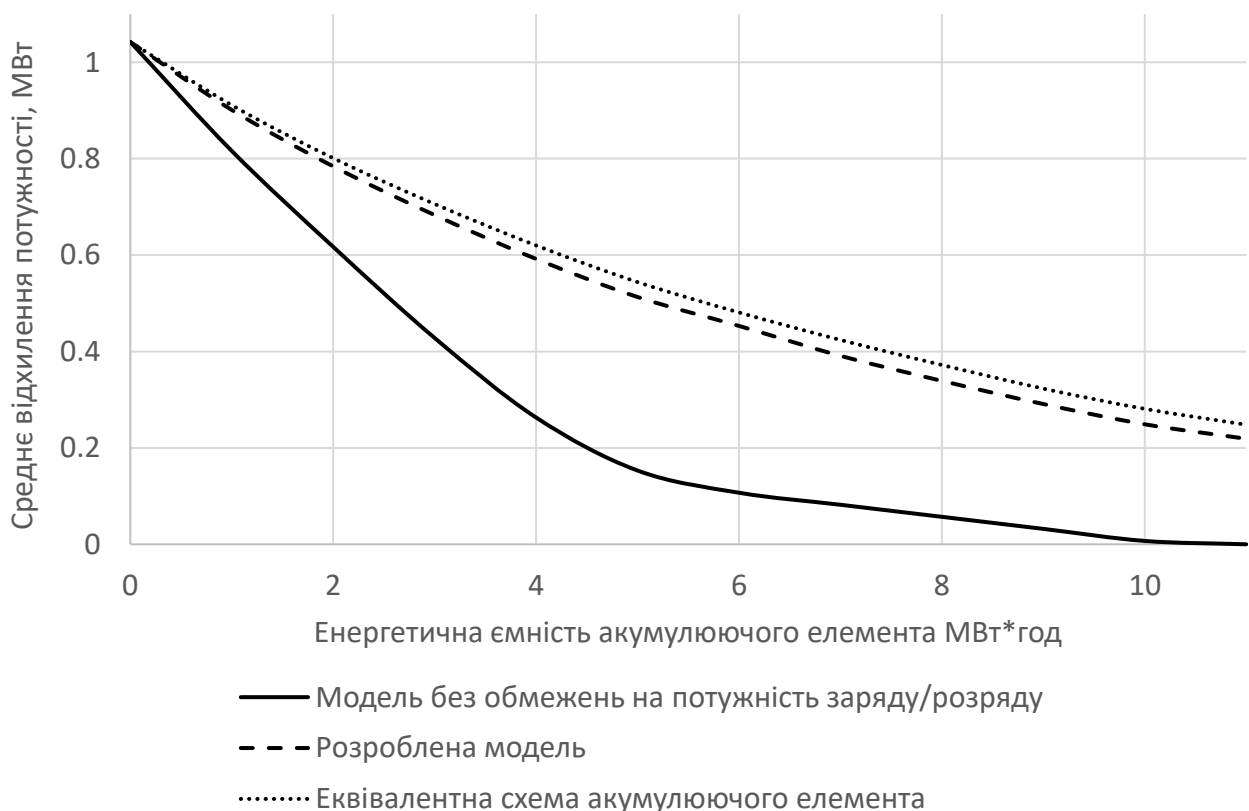


Рис. 3.10 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності

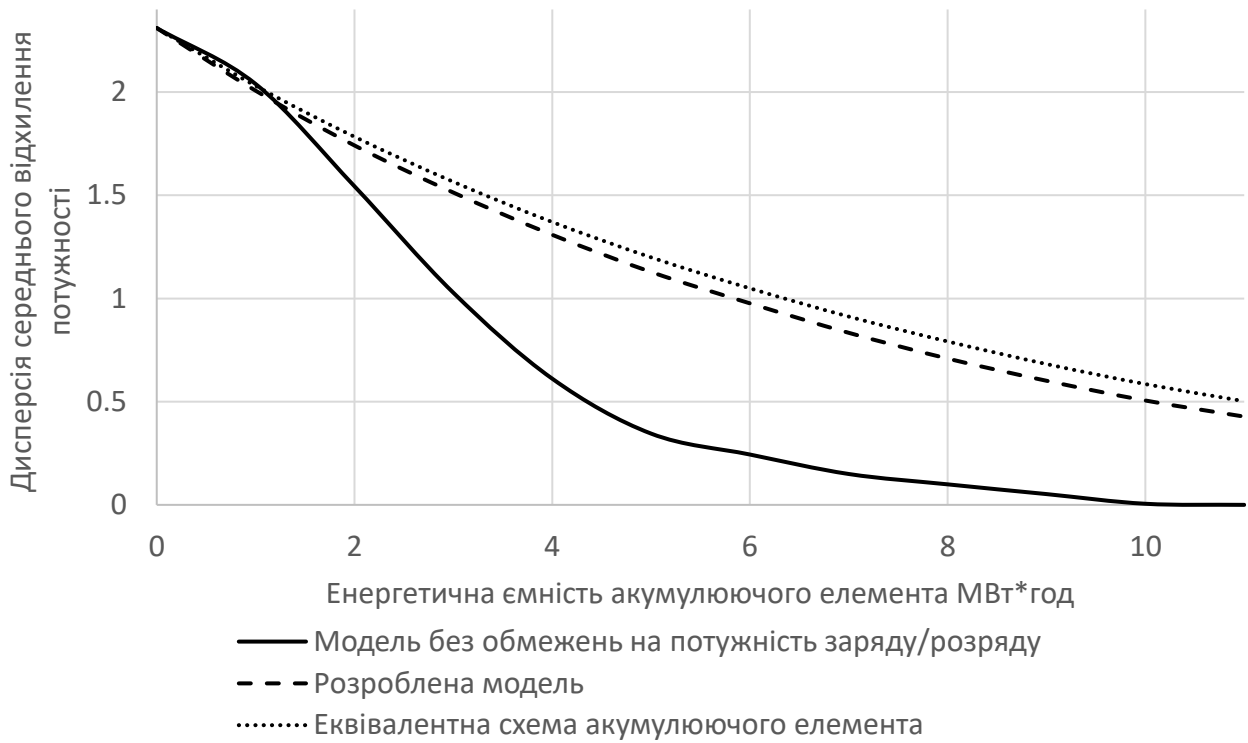


Рис. 3.11 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і дисперсією середнього відхилення потужності

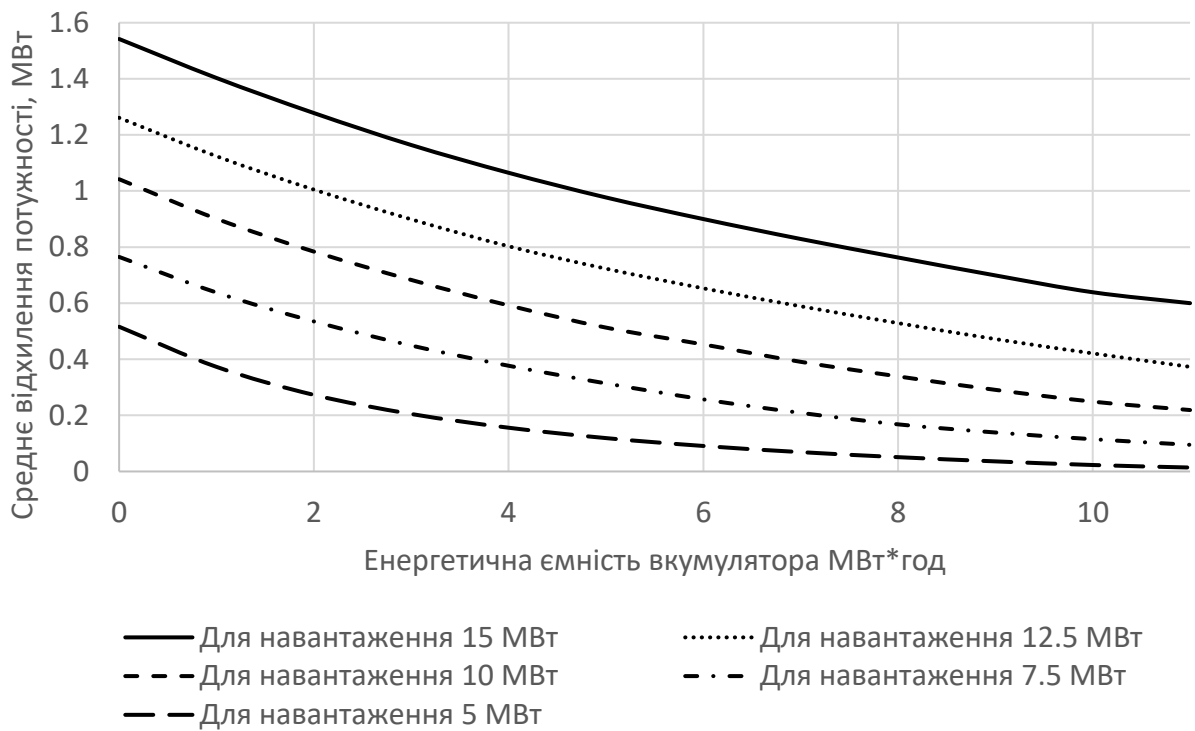


Рис. 3.12 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності

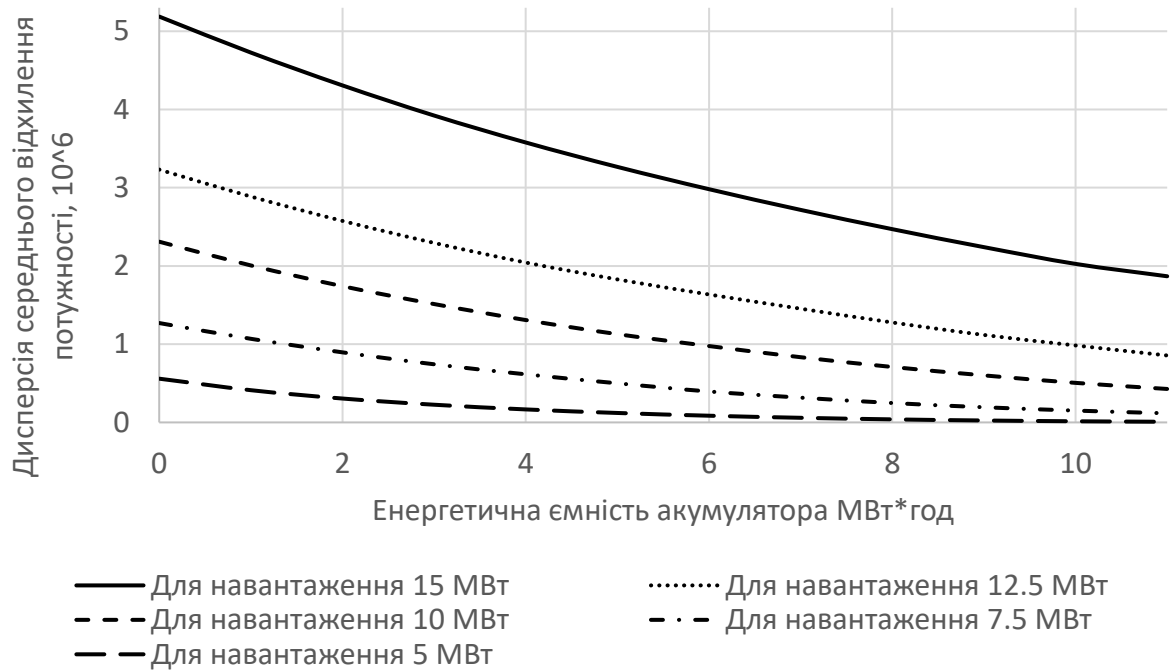


Рис. 3.13 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і дисперсією середнього відхилення потужності

Проведено апроксимацію отриманих залежностей. Для апроксимацію дисперсії середнього відхилення потужності використано метод найменших квадратів і лінійну регресію, апроксимуюча функція має вигляд $y = 0.0038x^3 - 0.0859x^2 + 0.9563x - 2.5691$, коефіцієнт кореляції в такому випадку становить 0.9986, а для середнього відхилення потужності $y = 0.1019x + 0.006$, коефіцієнт кореляції рівний 0.9994. Наведені функції, дозволяють оцінити рівень дисперсії середнього відхилення і середнє відхилення потужності для заданого значення навантаження споживачів, проте ця функція актуальна тільки коли максимальна потужність ВЕС значно перевищує навантаження споживачів. Тоді, не виникає ситуації в якій ВЕС не здатна задовольнити навантаження при низькій швидкості вітру.

Залежність між енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності, що подані на Рис. 3.12, можна представити в дещо іншому вигляді. Нормалізуємо значення по осі ординат і по осі абсцис, для цього поділимо ці значення на відповідне навантаження. Результати представлені на Рис. 3.14.

Отримана крива апроксимується за допомогою функції $y = 0.1099 * 0.218^x$. Де, y – середнє відхилення потужності ВЕС поділене на номінальну потужність ВЕС, x – енергетична ємність АЕ поділена на номінальну потужність ВЕС.

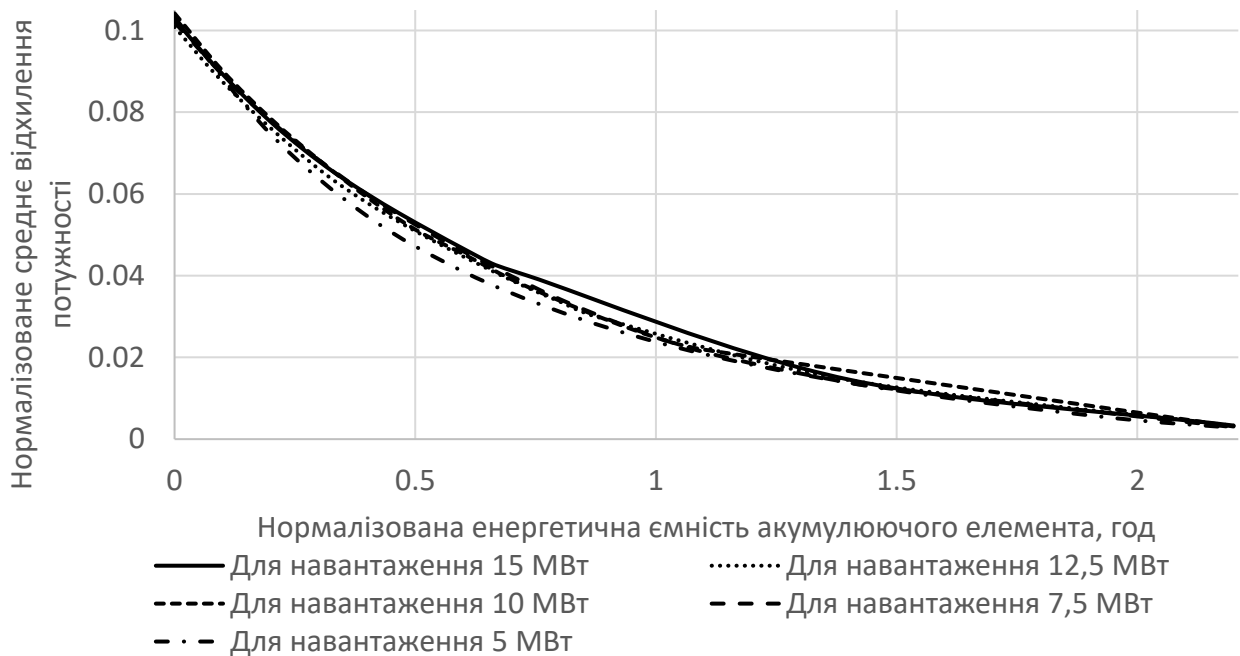


Рис. 3.14 Залежність між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і нормалізованим середнім відхиленням потужності

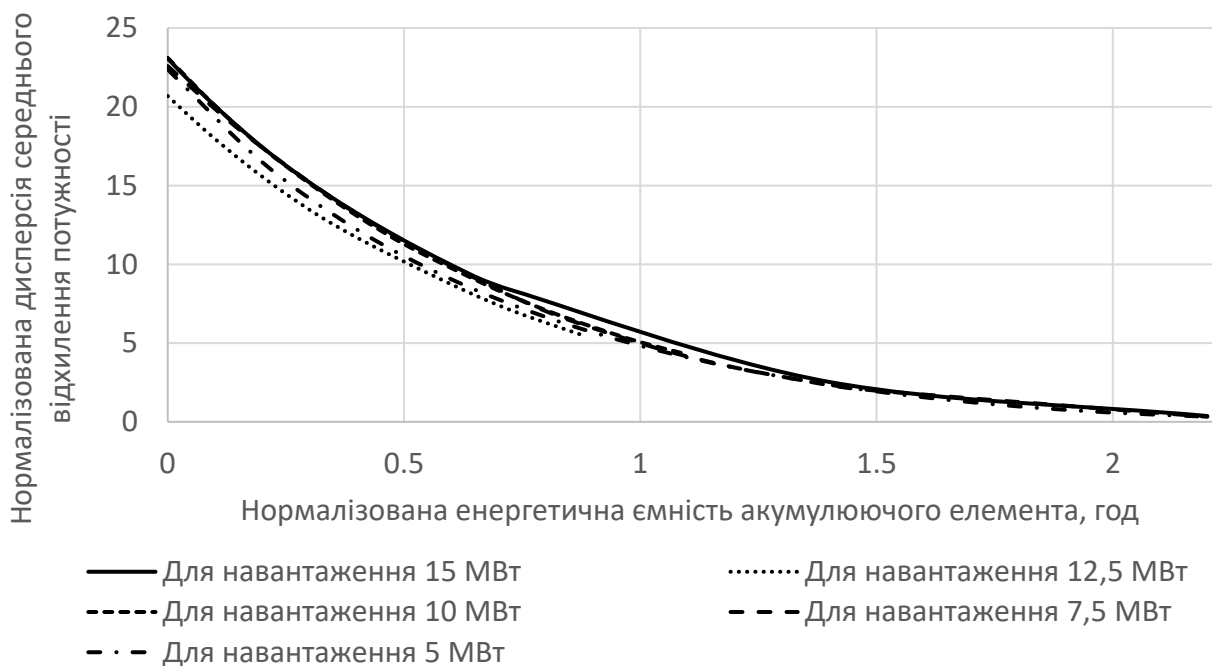


Рис. 3.15 Залежність між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і нормалізованою дисперсією середнього відхилення потужності

На основі даних, що представлені на Рис. 3.14 і Рис. 3.15, можна зробити висновок, що знайдена залежність не залежить від навантаження ВЕС, проте її вигляд значною мірою залежить від характеристик вітрового енергетичного потенціалу. Тобто, якщо для місця розташування ВЕС характерна швидка зміна швидкості вітру, середнє відхилення потужності на одиницю навантаження збільшиться і навпаки.

За аналогічних умов проведено комп'ютерне моделювання використовуючи генетичні алгоритми і рекурентні нейронні мережі для розв'язання задачі знаходження активного складу ВЕС. На Рис. 3.16 і Рис. 3.17 наведено результати моделювання.

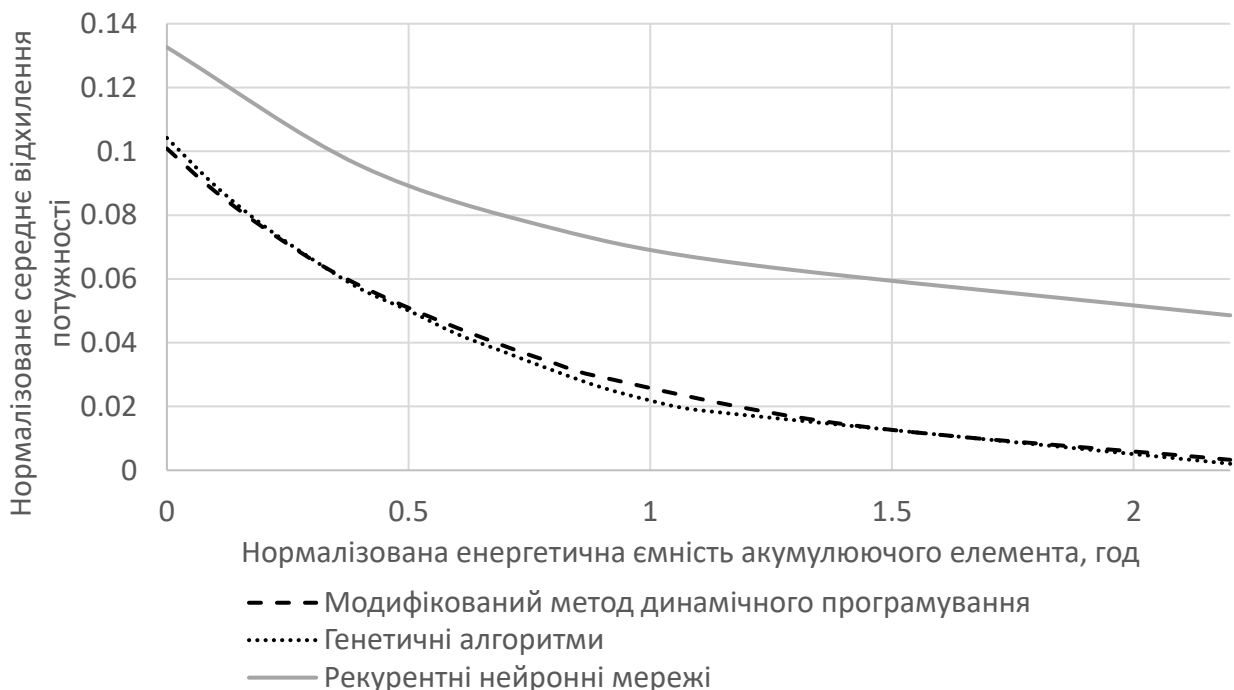


Рис. 3.16 Порівняння залежностей між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і нормалізованим середнім відхиленням потужності

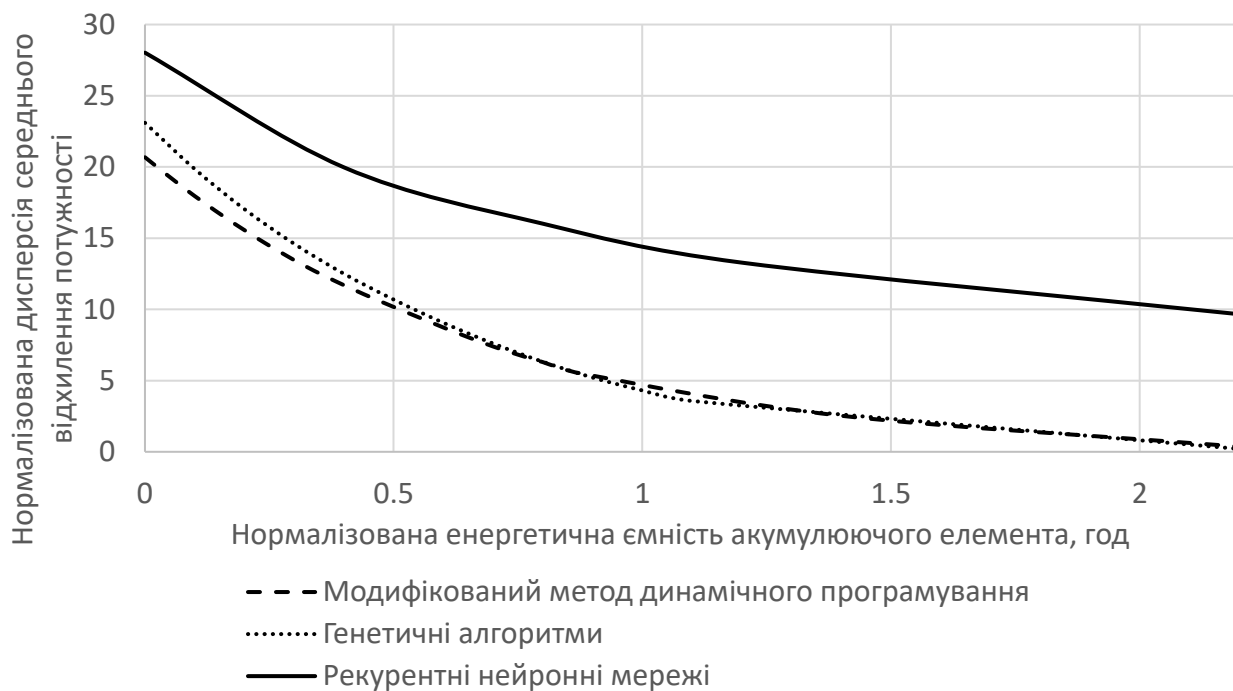


Рис. 3.17 Порівняння залежностей між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і нормалізованим середнім відхиленням потужності

Аналізуючи отримані залежності, можна помітити, що модифікований метод динамічного програмування і генетичні алгоритми показали майже однакові результати, на відміну від рекурентних нейронних мереж. Для яких нормалізоване середнє відхилення на 0,04-0,05 більше, а нормалізована дисперсія середнього відхилення більша на 7-10 одиниць.

Для гібридної вітро-сонячної системи енергопостачання проведено комп'ютерне моделювання для варіантів системи з різним енергетичним вкладом вітрової і сонячної складової гібридної системи. Так, позначення «75/25» означає, що 75% від сумарної енергії виробленої гібридною системою складає енергії вироблена вітровими електричними установками і 25% сонячними панелями, за відсутності обмежень на генерацію електроенергії. Гібридна система з конфігурацією «50/50» складається з 40 ВЕУ моделі V52/850 і з $5 \cdot 10^5$ м² сонячних панелей встановлених під кутом 25° з коефіцієнтом корисної дії 18%. Енергетична ємності акумулюючого елемента збільшується з 0 МВт*год до 100 МВт*год, ККД акумулюючого елемента становить 97%.

Середнє навантаження споживачів прийнято на рівні 30 МВт.

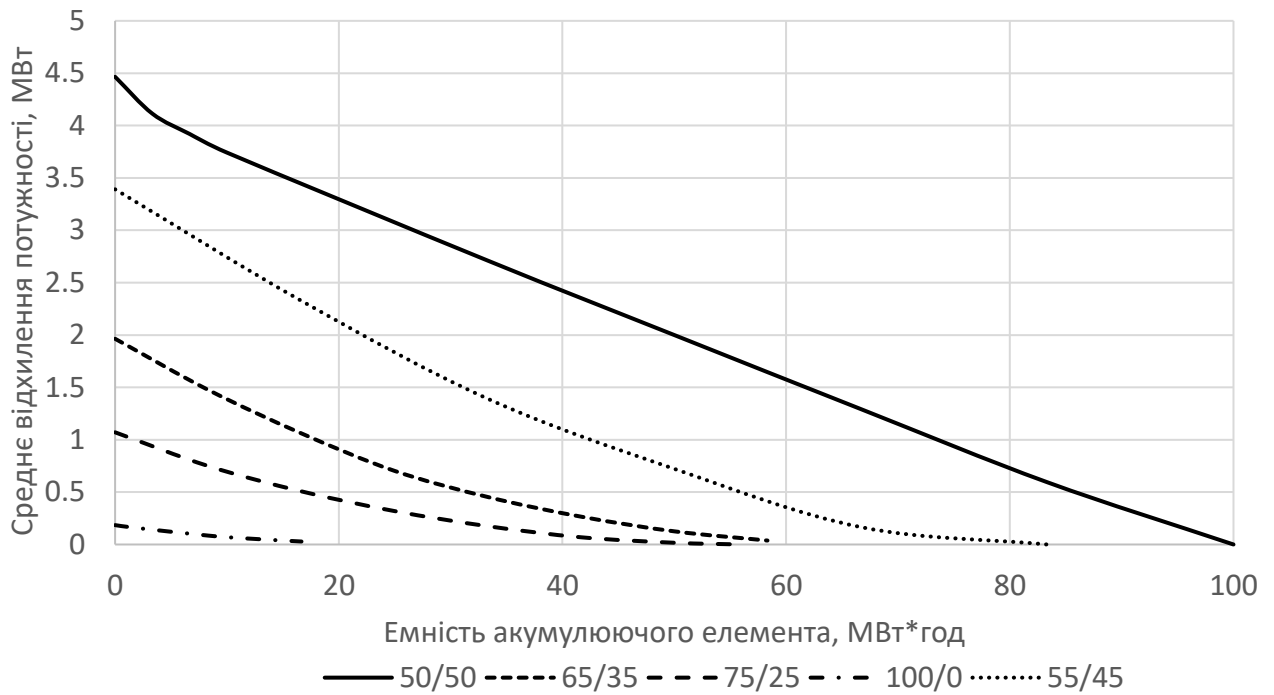


Рис. 3.18 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності

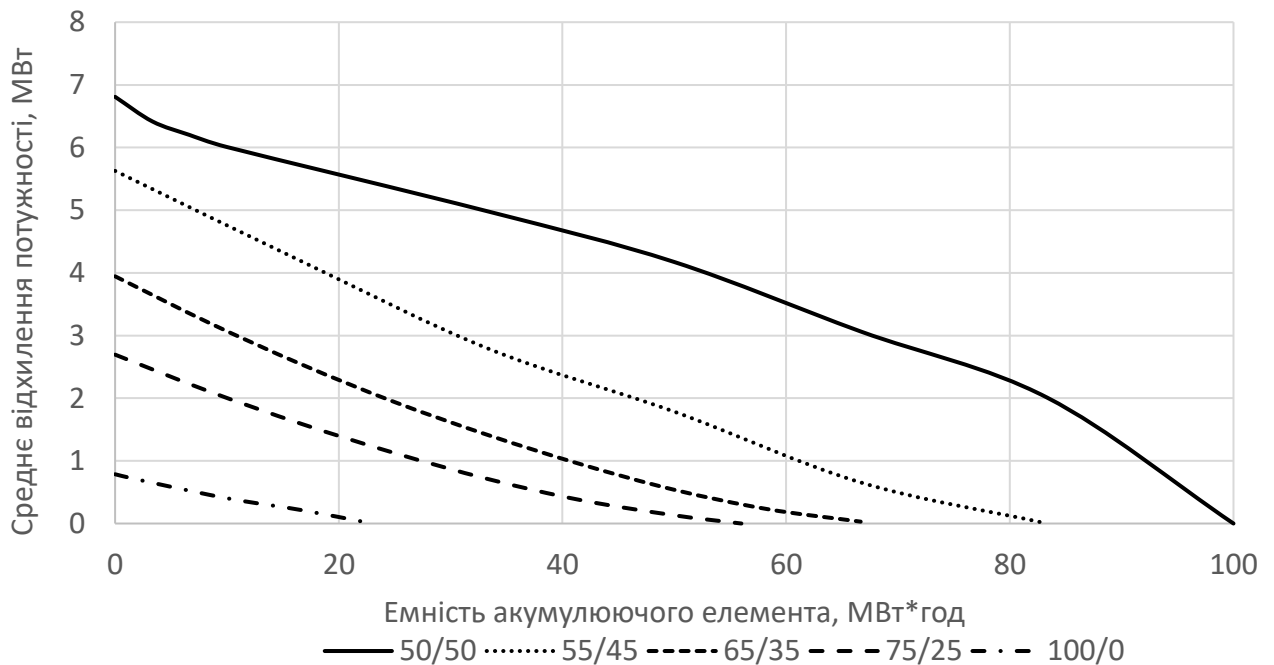


Рис. 3.19 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і дисперсією середнього відхилення потужності

Виконано нормалізацію отриманих даних, для цього значення по осі

ординат поділено на навантаження. Результати представлені на Рис. 3.20 і Рис. 3.21.

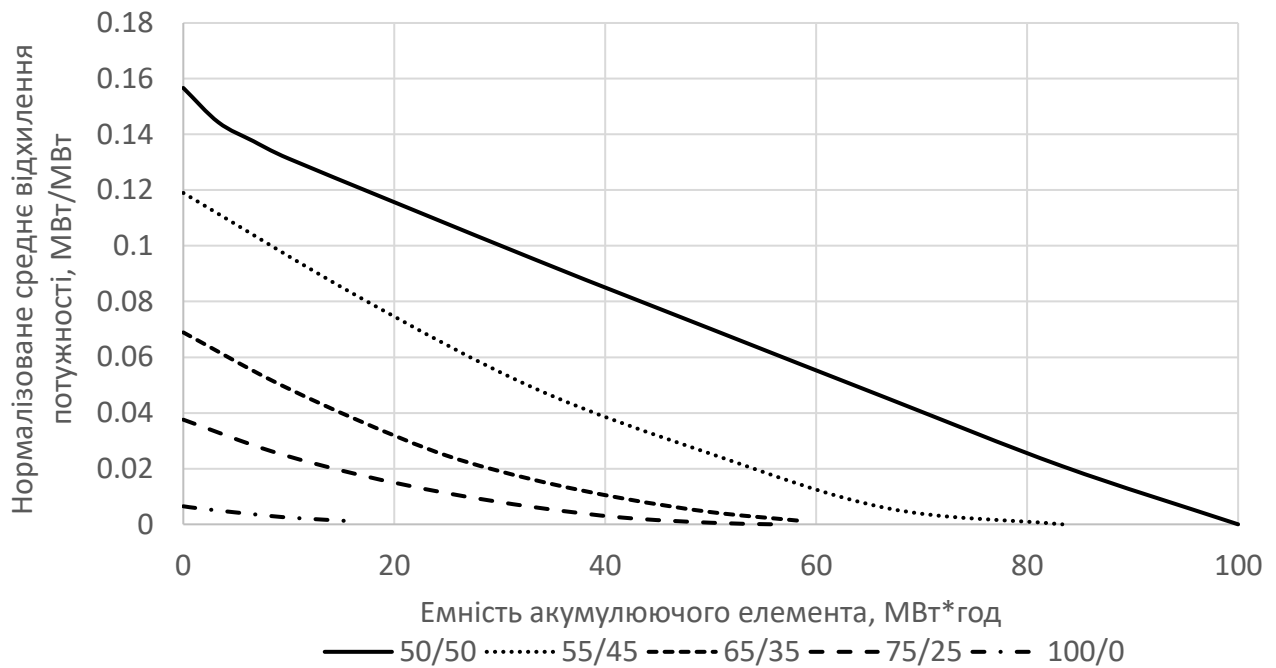


Рис. 3.20 Залежність між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і середнім відхиленням потужності

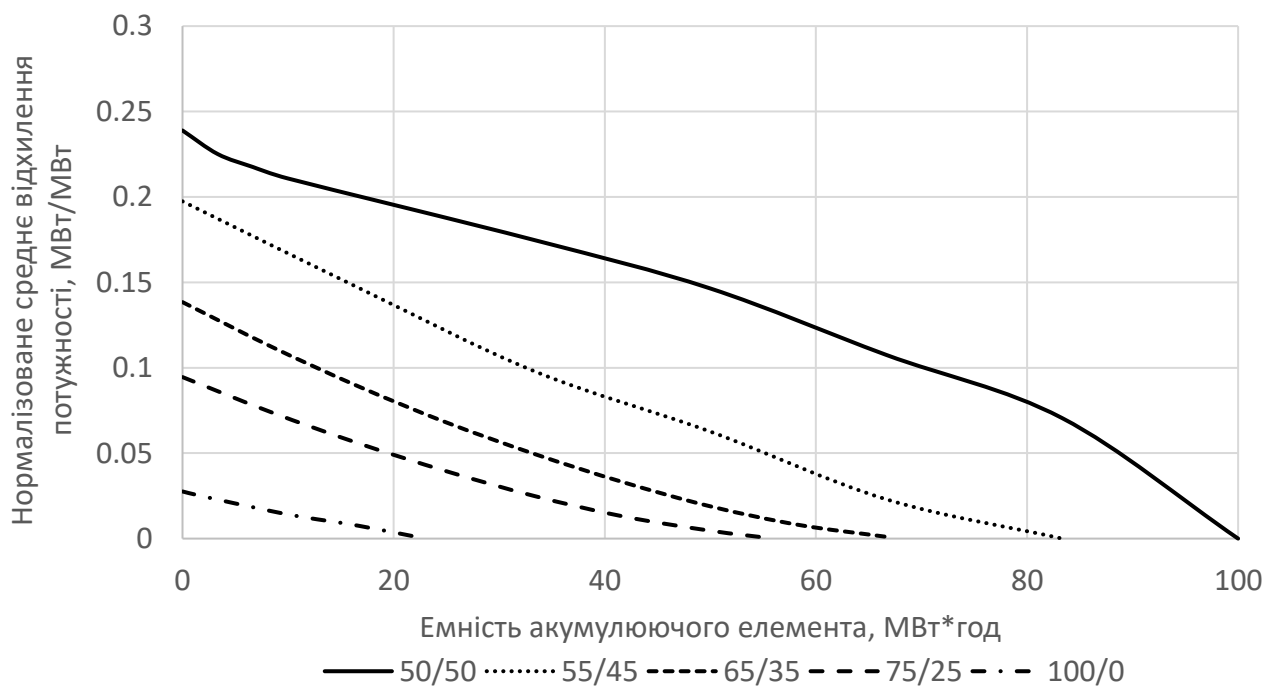


Рис. 3.21 Залежність між нормалізованою енергетичною ємністю АЕ і дисперсією середнього відхилення потужності

На відміну від автономних вітрових електричних станцій, де акумулюючий елемент використовуються для компенсації потужності при перехідних процесів, або як резервне джерело у випадку короткотривалої відсутності вітру, основна задача акумулюючого елемента в гібридній системах електропостачання – це акумулювання сонячної енергії для її подальшого використання в нічний період доби. На Рис. 3.20 і Рис. 3.21 видно, що при включенні в гібридну систему електропостачання сонячних панеле призводить до значного зростання дисперсії середнього відхилення і середнього відхилення потужності. Так, при заміні 25% потужності вітрових електричних установок сонячними панелями розмір енергетичної ємності акумулюючого елемента, що необхідний для забезпечення стабільного енергопостачання, збільшується майже в 3 рази.

Отримані результати дозволяють оцінити рівень дисперсії середнього відхилення і середнє відхилення потужності для гібридних систем, що мають різне відношення між очікуваною потужністю (середня потужністю з врахуванням вітрового енергетичного потенціалу в місці розташування станції) всіх вітрових електричних установок і очікуваною потужністю сонячних панелей.

На Рис. 3.22 наведено залежності між кількістю циклів заряду-розряду акумулюючого елемента і енергетичною ємністю акумулюючого елемента. На основі отриманої залежності можна стверджувати, що при малій ємності акумулюючий елемент використовується значно інтенсивніше (більша кількість циклів заряду-розряду), що призводить до швидкої деградації акумулюючого елемента.

Отримані результати можуть бути використані для оцінки швидкості деградації акумулюючого елемента і при проведенні обслуговування.

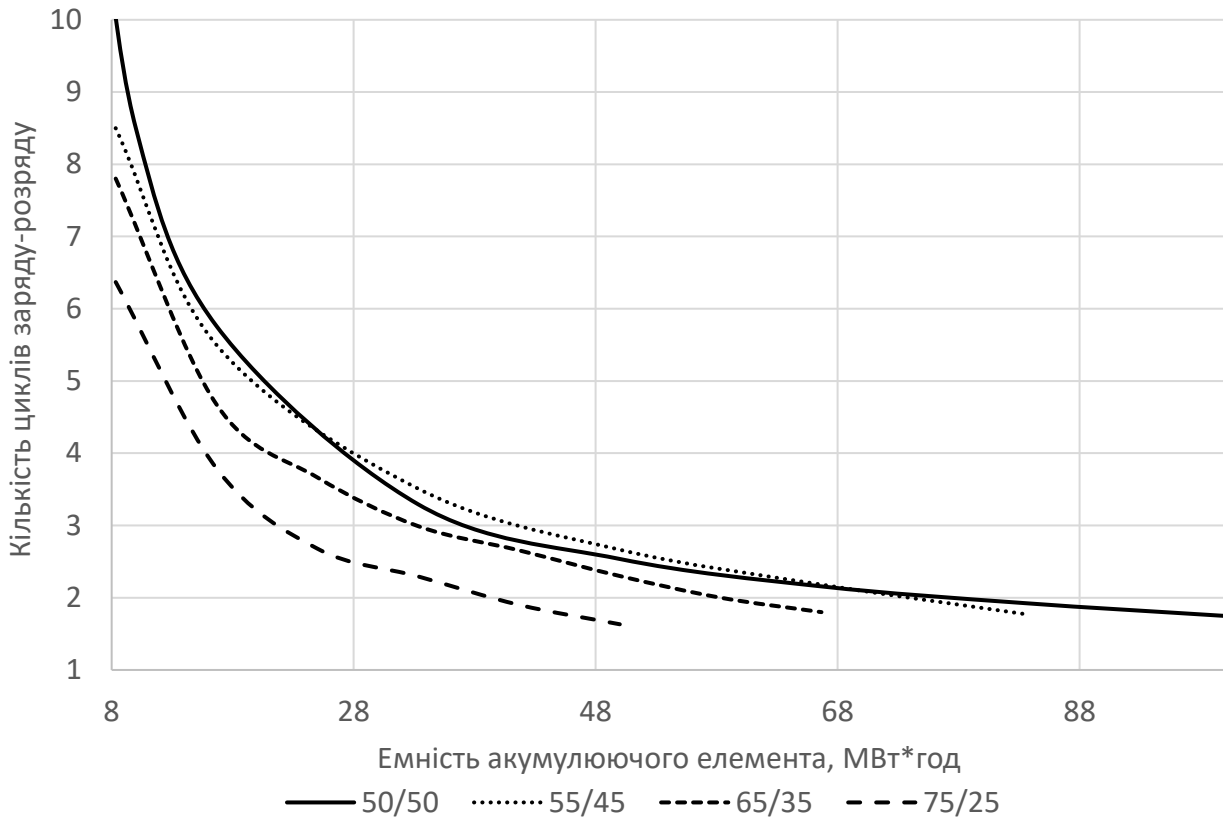


Рис. 3.22 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і кількістю повних циклів заряду-розряду

3.5 Визначення коефіцієнта прозорості атмосфери для конкретних географічних координат

На етапі проектування гібридних систем енергопостачання необхідно оцінити середню потужність сонячної складової протягом довгого періоду часу (сезону, року) для обґрунтування економічної доцільності побудови системи енергопостачання і для обґрунтування номінальної енергетичної ємності акумулюючого елемента. Попередня оцінка середньої потужності СЕС може бути проведена за допомогою середнього значення коефіцієнта прозорості атмосфери P_s , що характерне для даної географічної точки і сезону.

З метою визначення коефіцієнта прозорості атмосфери для території України, було опрацьовано дані інтенсивності сонячної радіації отримані з сайту wunderground.com [108]. Для аналізу вибрано чотири метеостанції, які

розташовані в різних регіонах України. Детальна інформація про метеостанції наведена в Таблиця 3.8.

Таблиця 3.8 Дані про метеостанції

Id	Ширина	Довгота	Розташування
IKHMELNY12	50.088'N	26.795'E	Васьківці, Хмельницька область
IGMINAPR3	49.794'N	22.720'E	Острів, Польща
IKIEVKHL2	50.186'N	30.170'E	Мала Солтанівка, Київська обл.
I1149	46.561'N	30.839'E	с. Фонтанка, Одеська область

У зв'язку із неповнотою даних, необхідно провести додаткове їх опрацювання. Приклад даних представлений на рис. 2.

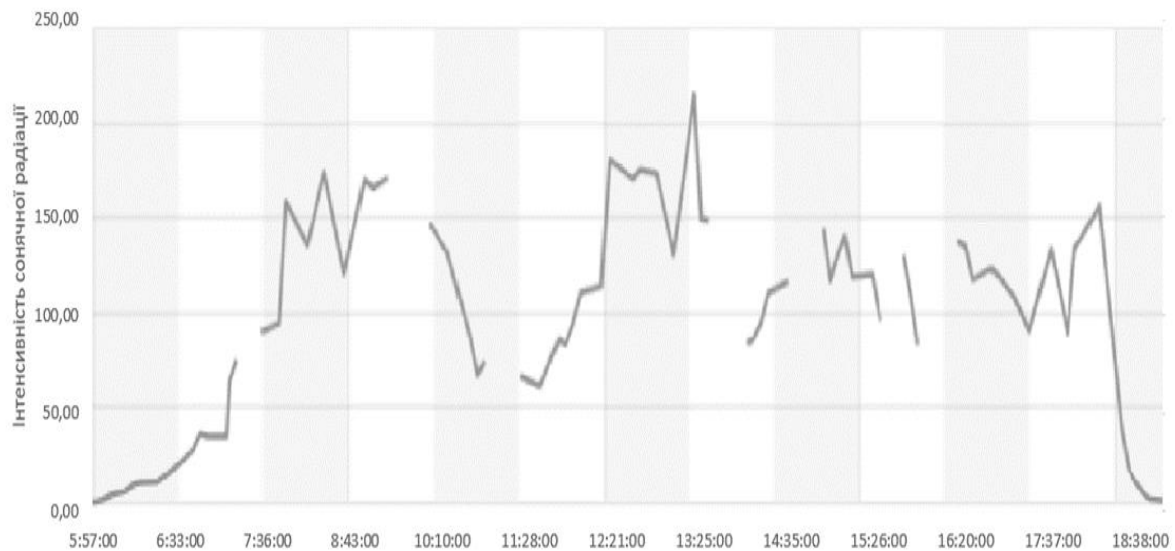


Рис. 3.23 Приклад наявних даних про інтенсивність сонячної радіації

Алгоритм додаткового опрацювання даних полягає у реалізації таких кроків:

1. Відкидаємо всі значення інтенсивності, що були отримані в нічний період. Ці значення знаходяться в діапазоні $0 - 1 \text{ Вт/м}^2$.
2. Використовуючи алгоритми розрахунку позиції сонця [90, 91] знаходимо значення інтенсивності сонячної радіації без врахування розсіювання енергії в атмосфері (I_p).
3. Знаходимо відношення інтенсивності сонячної радіації (I_e), отриманої у результаті вимірювань, та розрахованої інтенсивності сонячної радіації (I_p).

$$P = m \sqrt{\frac{I_B}{I_p}} \quad (3.18)$$

де m – оптична маса.

4. Відсіюємо усі значення коефіцієнта прозорості атмосфери, які менші за 0,05. Зазвичай, коефіцієнта прозорості атмосфери варіюється в межах 0,8 – 0,2 [88].
5. Дискретизуємо отримані значення з кроком Δd .

Знаходимо функцію розподілу імовірностей коефіцієнта прозорості атмосфери $f(p)$ шляхом поділу кількості вимірювань, що знаходяться в інтервалі на загальну кількість вимірювань. На Рис. 3.24 наведено приклад знайденої функції розподілу для метеостанції, що розташована на території Київської області (id = ІКІЕВКНЛ2) [109].

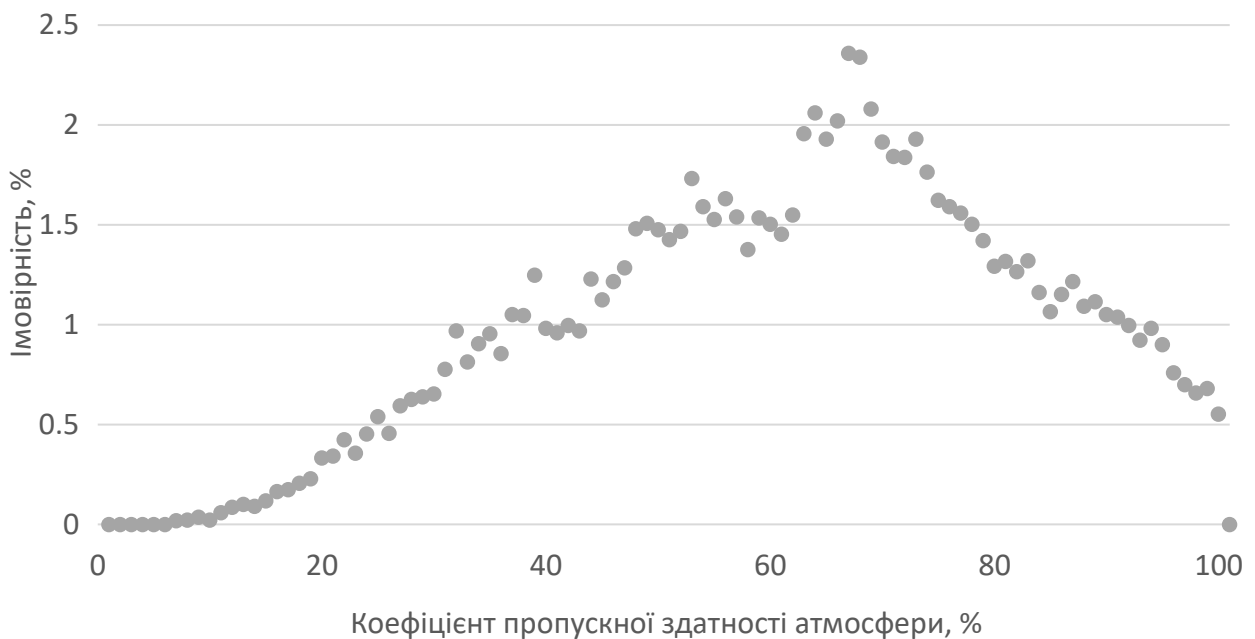


Рис. 3.24 Гістограма розподілу імовірностей коефіцієнта прозорості атмосфери

Будуємо функцію розподілу ймовірностей коефіцієнта прозорості атмосфери $F(P)$, на основі знайденої функції розподілу імовірностей, використовуючи відношення:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(t) dt \quad (3.19)$$

На основі отриманих даних, знайдемо математичне сподівання

використавши означення Чебишова та дисперсію:

$$\mu = E(X) = \sum_x xp(x) \quad (3.20)$$

де x – значення випадкової величини, $p(x)$ – імовірність появи відповідного значення, за умови що:

$$\sum_x p(x) = 1 \quad (3.21)$$

Використовуючи описаний вище метод, було проаналізовано дані метеоспостережень протягом 2017.01.01 – 2017.12.01 для заданих метеостанцій. Визначено середнє значення коефіцієнта прозорості атмосфери для чотирьох географічних пунктів. Результати опрацювання наведено на Рис. 3.25.

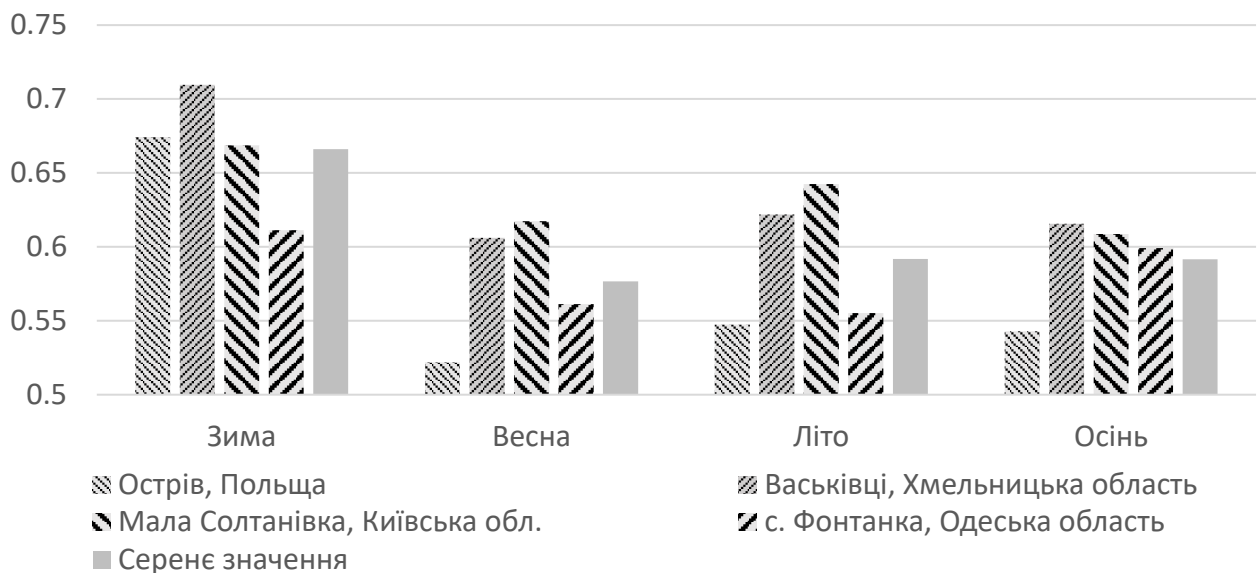


Рис. 3.25 Діаграма середнього значення коефіцієнта прозорості атмосфери

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що для території України, середнє значення коефіцієнта прозорості атмосфери для зимового періоду варіюється в межах $[0,61; 0,7]$, для весняного періоду в межах від $[0,52; 0,61]$, для літнього $[0,55; 0,64]$, а для осіннього $[0,54; 0,61]$.

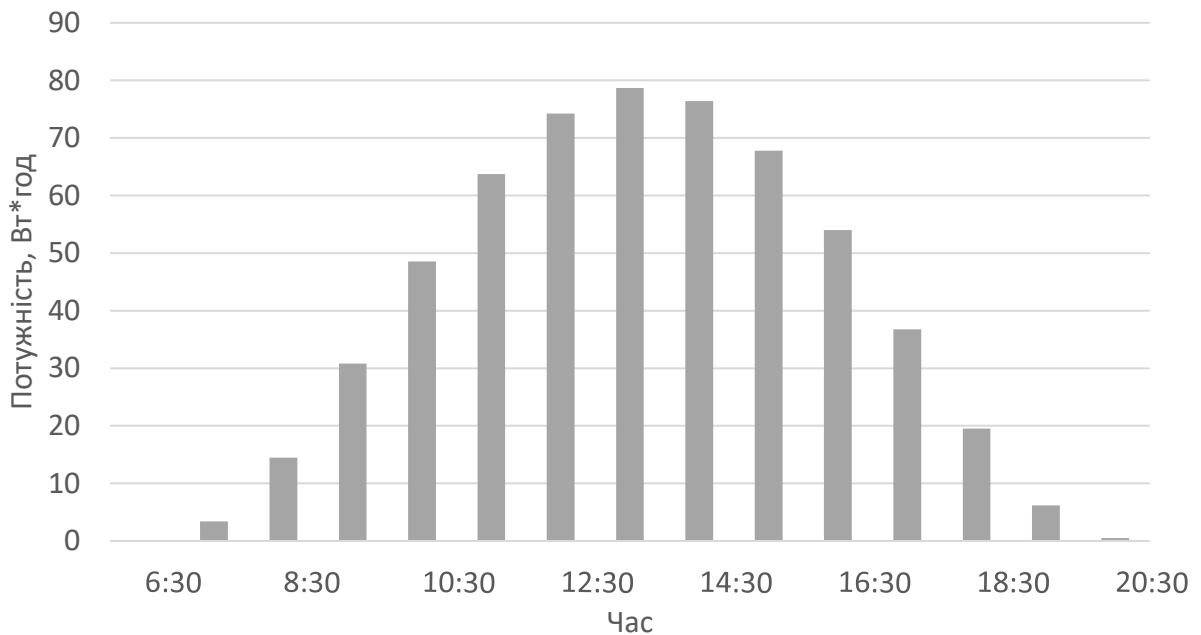


Рис. 3.26 Графік кількості виробленої електроенергії

На Рис. 3.26 наведено результати оцінювання кількості електроенергії, яка може бути вироблена одним квадратним метром сонячних панелей протягом 15 липня. Припустимо, що СЕС розташована в околиці Львова, СП направлені на південь під кутом 35° , а ККД панелей становить 15%. При обчисленні використано модель перетворення сонячної енергії, що була описана в розділі 2.3.

Висновки до розділу 3

Розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який за рахунок використання генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж забезпечує підвищення швидкодії вибору та адаптацію активного складу до умов зовнішнього середовища. Аналізу результатів застосування генетичних алгоритмів (ГА) і повнорекурентних штучних нейронних (РНМ) мереж показав, що використання ГА збільшує середній небаланс потужності ΔP на 15% ніж МДП. Інші параметри, крім швидкості розв'язання задачі, знаходяться на майже одному рівні з МДП. Швидкість розв'язання задачі ГА в 3.6 рази більша порівняно з показниками МДН. Середній

небаланс потужності ΔP для РНМ в 30 раз більше ніж для МДП, попри те, швидкість розв'язання задачі в 85 раз більша.

Досліджено вплив розміру акумулюючого елемента на параметри роботи вітрової електричної станції (ВЕУ) і гібридної вітро-сонячної системи електропостачання. Дослідження проведено для ВЕУ з номінальною потужністю від 5 МВт до 15 МВт і для ємності АЕ від 0 МВт*год до 11 МВт*год. При дослідженні гібридної системи використано п'ять конфігурації, з різною кількістю вітрових електричних установок і сонячних панелей. Для дослідження використано реальні дані швидкості вітру і інтенсивності сонячної радіації, отримані з метеостанції, що розташована неподалік Львова.

Уточнено значення коефіцієнта прозорості атмосфери для чотирьох географічних точок України. Отримані дані, можуть бути використанні про проектування сонячних електричних станцій, або гібридних вітро-сонячних систем електропостачання.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ ЕНЕРГОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВІТРО-СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Цей розділ присвячений розробці елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень для управління вітро-сонячною системою генерації електроенергії. В процесі розробки використано сучасні підходи до проектування, розробки, тестування програмних застосунків, а також сучасні засоби розробки. Деякі компоненти системи реалізовано з використанням патернів проектування, таких як: MVC, фабричний метод, одинак, фасад, стратегія і інших.

4.1. Обґрунтування засобів розробки

Мова програмування Java

Одне з головних переваг мови програмування Java – її незалежність від платформи, на якій виконуються програми, або кросплатформеність. Таким чином, один і той самий код можна запускати під управлінням різних операційних систем. Це стає дуже важливим, коли програми завантажуються за допомогою глобальної мережі Інтернет і використовуються на різних платформах. Іншою, не менш важливою перевагою мови Java, є велика схожість з мовою програмування C++. Знайомі з синтаксисом C і C++ розробникам буде легко освоїти Java. Крім того, Java – це об'єктно-орієнтована мова, всі сутності в мові Java є об'єктами, за винятком небагатьох основних типів (primitive types), наприклад, чисел. Крім того, в Java 8 додано елементи властиві функціональним мовам програмування, такі як: лямбда-виразів, віртуального розширення і інші.

Середовище розробки IntelliJ IDEA

IntelliJ IDEA представлена в двох редакціях Community і Ultimate Edition. IntelliJ IDEA Community Edition є вільним модульним, інтегрованим

середовищем розробки програмного забезпечення. Середовище розробляється та підтримується компанією JetBrains. Середовище може бути використане для розробки застосунків на мовах Java, Groovy, Kotlin, Scala (через плагін), Python и Jython(через плагін). Середовище розробки включає також Eclipse JDT для Java. Підтримується розробка застосунків для мобільної платформи Android. Наявна можливість встановлення плагінів, що значно розширює функціонал середовища і дозволяє налаштувати IntelliJ IDEA відповідно до особливостей розробки і побажань кожного розробника.

IntelliJ IDEA Community Edition поширюється в рамках ліцензії Apache 2.0, що дає користувачеві право використовувати програмне забезпечення для будь-яких цілей, вільно поширювати і змінювати його. Підтримуються такі операційні системи, як: Windows, Linux, Mac OS.

На відміну Community Edition, IntelliJ IDEA Ultimate Edition є платним програмним забезпеченням. Ultimate Edition надає ширший спектри можливостей роботи з JavaScript, TypeScript, CoffeeScript, ActionScript, а також має підтримку великої кількості популярних фремворків, таких як: Spring (Spring MVC, Spring Boot, Spring Integration, Spring Security і інші), Java EE, Hibernate і інші. Описані вище переваги дозволили IntelliJ IDEA стати одним з найпопулярніших середовищем розробки серед Java розробників програмного забезпечення.

4.1.1 Патерни проектування

Для проектування базової архітектури застосунку використано патернів проектування MVC. MVC або Model-view-controller (Модель-представлення-контролер) – це архітектурний шаблон, який був сформульований Трюгве Реенскаугом (Trygve Reenskaug) в кінці 1970-х і застосовується для проектування та розробки програм застосунків з користувацьким інтерфейсом [110]. Основна ідея патерна полягає в розділенні системи на взаємопов'язані частини таким чином, щоб мінімізувати кількість залежностей між ними. В MVC системи розділяється на такі частини як: модель даних, представлення даних, модуль

взаємодії. Використання патерну проектування MVC дозволяє розробляти модель і відображення незалежно, а також забезпечує високу гнучкість при розширенні програм чи внесенні будь-яких подальших змін. Основні елементи MVC це:

Модель (Model) є основним компонентом MVC, вона відповідає за процес збереження даних і надання доступу до них. Модель не має залежностей на відображення і контролер, що дозволяє виконувати її розробку і тестування як незалежний компонент.

Відображення (View) відповідає за представлення даних з моделі користувачеві в зручному для нього формі (текст, зображення, діаграми, тощо). В задачі відображення не входить опрацювання даних отриманих від користувача, чи інших джерел. Існує два способи реалізації відображення активне відображенні і пасивне відображення. При активному відображенні, відображення має залежність на модель і може напряму отримувати дані з моделі. При пасивному відображенні, відображення отримує дані тільки через контролер. Тобто, відображення і модель ніяк не зв'язані.

Контролер (Controller) – це компонент, який забезпечує взаємозв'язок між моделлю і відображенням. Контролер відслідковує подій, які виникають в результаті дій користувача. Опрацьовує їх і перетворює в команди для моделі, після опрацювання даних моделлю отримує відповідь і оновлює представлення.

На Рис. 4.1 представлена загальна схема взаємодії компонентів MVC з активним і з пасивним відображенням. Використання MVC має ряд переваг, а саме:

- Підтримка декількох представлень. Незалежність моделі від відображення дозволяє відображувати дані з моделі за допомогою декількох різних представлень. Наприклад, через користувацький інтерфейс і прикладний програмний інтерфейс (API).

- Низька вартість оновлення відображення. Низька зв'язність між відображенням і іншими частинами системи дозволяє оновлювати

представлення (чи додавати нове) без змін за межами цього компонента системи. Що суттєво зменшує час на розробку і тестування.

- Масштабованість. Оскільки компоненти є незалежними, при правильному використанні патерна MVC, при розробці до існуючих компонентів можна легко додати нові, або змінені вже існуючі. Висока структурованість коду також дозволяє суттєво зменшити час на оновлення існуючого коду.

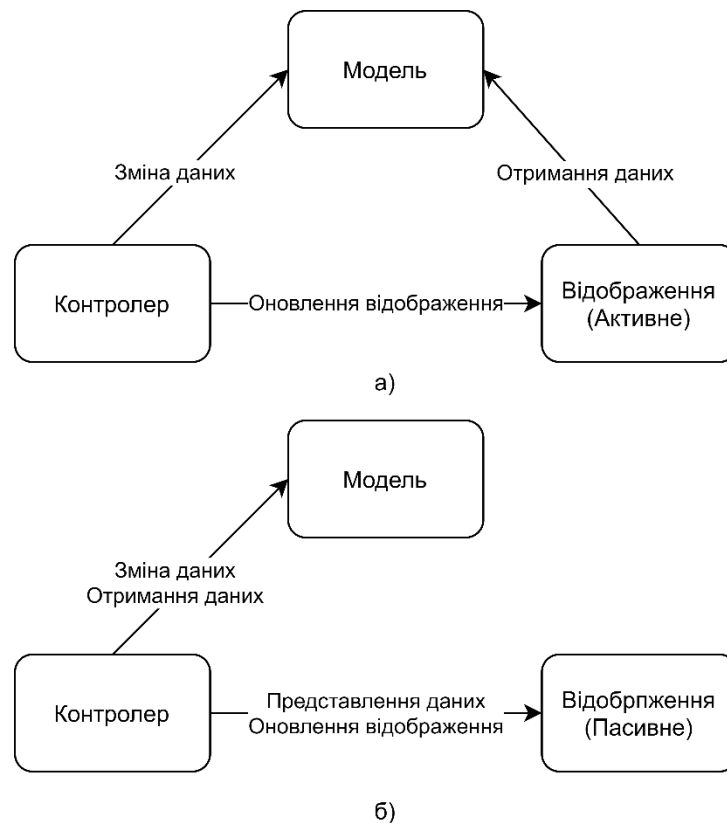


Рис. 4.1 Схема MVC а) з активним відображенням, б) з пасивним відображенням

Деякі стандартні бібліотеки Java підтримують парадигму MVC. Троте, більш широке застосування ця парадигма отримала в фреймворку Spring MVC, що використовується для розробки веб або RESTful сервісів.

Інший патерн, який широко застосовувався в процесі розробки, це стратегія. Стратегія – це один з поведінкових GOF патернів, який використовується для управління сімейством схожих алгоритмів, таким чином, що їх можна було замінювати в процесі виконання програми [111]. Використання патерну стратегія надає ряд переваг: заміна алгоритмів під час виконання

програми; ізоляція код і даних алгоритмів від інших класів; реалізація принципу відкритості/закритості (один з SOLID принципів). Стратегія використана для управління алгоритмами визначення активного складу ВЕС, алгоритмами визначення вагових коефіцієнтів параметрів ВЕУ і іншими.

4.1.2 Фреймворк Spring Boot

Spring Boot – це фреймворк який надає розробнику засоби, що пришвидшують створення з нуля, налаштування і розгортання застосунків, які використовують Spring Framework. Spring Boot значно розширює можливості Spring, найбільш значні особливості Spring Boot порівняно з Spring це:

- управління залежностями;
- автоматичне налаштування;
- вбудований web-сервер.

Створення окремих пакетів з необхідними сторонніми залежностями для кожного з кожного з типів Spring-застосунків дозволяє значно пришвидшити розробку застосунку на початкових етапах. Ці пакети називаються стартери (starter-пакетами). На даний момент існує близько 50 офіційних starter-пакетів, зокрема такі як: spring-boot-starter-web, spring-boot-starter-data-jpa, spring-boot-starter-mobile, spring-boot-starter-test і інші. Starter-пакети дозволяють отримати універсальне рішення, яке підходить для використання з Spring. При необхідності, на основі існуючих starter-пакетів, можна створити новий.

Наступна особливість – це автоматичне налаштування. Після додавання в проект starter-пакетів Spring Boot спробує автоматично налаштувати застосунок відповідно до доданих вами залежностей. Наприклад, при додаванні в проект spring-boot-starter-jdbc (стартер для доступу до бази даних) Spring Boot спробує налаштувати доступ до бази даних, відповідно до інформації з файлів конфігурації. При відсутності такої інформації він налаштує базу в пам'яті (при наявності H2 залежності). Автоматичне налаштування може бути змінено в будь-який момент.

Spring Boot має вбудований web-сервер, що дозволяє запускати застосунки

не використовуючи ніяких сторонніх web-серверів. Наявність вбудованого web-сервер усуває необхідність налаштуванням сторонніх серверів і рад проблем які можуть з цим виникнути. Також, дозволяє завантажувати зміни зроблені розробником без перезагрузки застосунку, це надзвичайно корисна функція, оскільки суттєво зменшує час розробки і дозволяє розробнику відслідковувати зроблені зміни в режимі реального часу.

Spring Boot базується на використанні фреймворка Spring. Spring – це фреймворк з відкритим програмним кодом написаний на мові програмування Java, який надає розробнику широкий набір засобів побудови застосунків [112]. Spring складається з близько 20 модулів, більшість з яких є незалежними. На Рис. 4.2 подано загальну структуру фреймворка Spring.

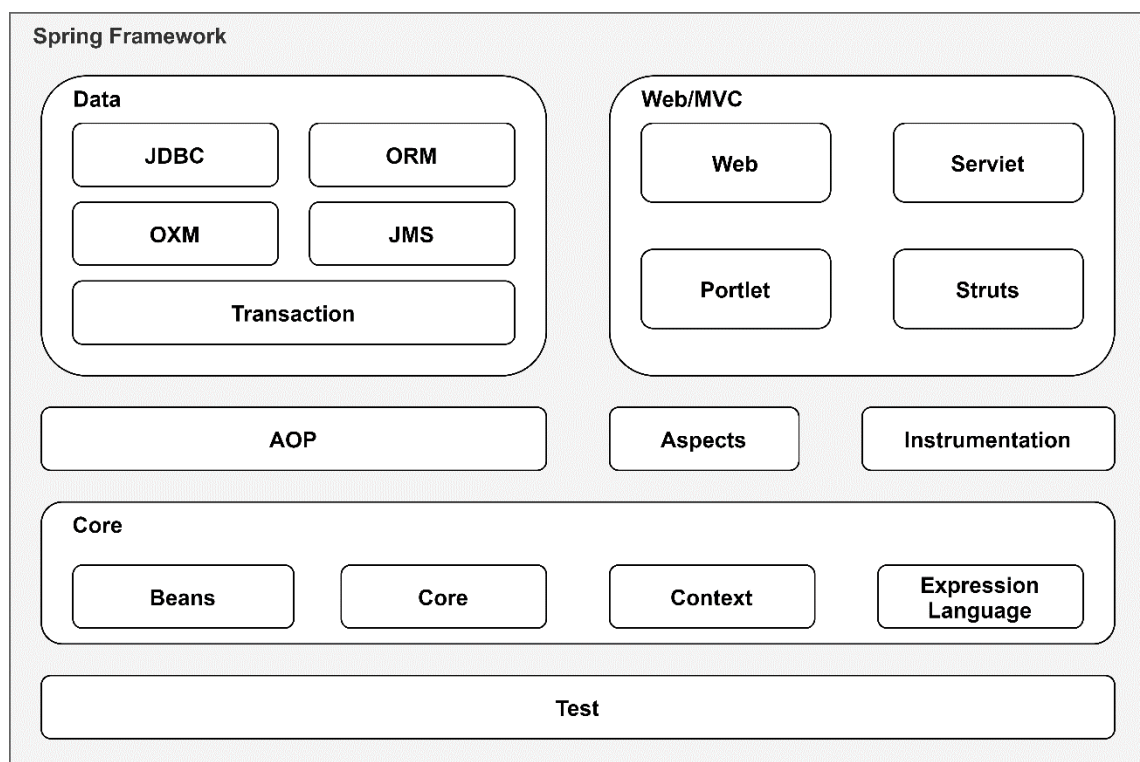


Рис. 4.2 Загальна структура фреймворка Spring

Модулі можна поділити на 4 великі групи:

- Базові модулі (Spring Core). Ці модулі реалізують принцип інверсії контролю (IoC), також відомий як інверсія залежностей. Ідея полягає в зменшенні залежностей між класами за допомогою винесення логіки, що створює екземпляри класу в «фабричний» метод і використовувати тільки його для

створення екземплярів класу. В такому випадку, при зміні логіки створення класу зміни необхідно зробити тільки в одному місці в «фабричному» методі.

- Модулі для роботи з базами даних(Spring Data). До їх складу можна віднести модулі JDBC, ORM, Transaction. JDBC (Java Database Connectivity). Ці модулі відповідають за створення підключення до бази даних, отримання і відправку даних в вигляді SQL-запитів. ORM (Object Relational Mapping) технологія, яка дозволяє зв'язувати базу даних з об'єктами в об'єктно-орієнтованих мовах програмування. В такому випадку, розробник працює з об'єктами, а не з SQL-запитами. Transaction модуль, який дозволяє реалізувати підтримку транзакцій на рівні коду.

- Модулі для розробки web-застосунків (Spring MVC/Web). Складається з Web модуля, який реалізує патерн MVC і з Security модуля, який надає засоби ідентифікації, авторизації користувачів, а також можливість обмежити доступ до функціоналу web-застосунка.

- Інші модулі, зокрема модулі для тестування (Spring Test), модулі для аспектно-орієнтоване програмування (Spring AOP) і інші.



Рис. 4.3 Засоби розроблення системи підтримки прийняття рішення

В результаті дослідження обґрунтовано використання інтегрованого середовища розробки IntelliJ IDEA; мову програмування Java; шаблон проектування MVC для організації архітектури додатку і фреймворк Spring Boot для проектування застосунку. На Рис. 4.3 подано співвідношення між обраними шаблонами, середовищем та технологіями.

4.1.3 Сторонні бібліотеки

Крім базових бібліотек, що входять в стандартний набір, в процесі розроблення програмного забезпечення використано декілька сторонніх бібліотек. А саме:

JFreeChart — бібліотека з відкритим програмним кодом для мови програмування Java, призначена для візуалізації даних за допомогою різноманітних діаграм. За допомогою JFreeChart можна створити різноманітні типи як 2D так і 3D діаграм, а саме: кругові діаграми, гістограми, діаграми часових рядів, лінійні графіки, комбіновані гістограми, комбіновані діаграми і інші. Бібліотека дозволяє будувати як статичними, так і динамічними діаграми. Вбудовані засоби надають широкі можливості щодо, налаштування діаграм, взаємодії з вже побудованими діаграмами, зменшення/збільшення, зміни вигляду кривих, побудови декількох діаграм в одній області видимості. Також, передбачена можливість виводу діаграм в вигляді зображень. Підтримується широкий спектр форматів виводу, основними серед яких є PNG, JPEG, PDF, SVG.

JFormDesigner – це графічний засіб розробки користувацьких інтерфейсів на мові програмування Java. Цей засіб дозволяє згенерувати код користувацького інтерфейсу за допомогою вбудованих графічних інструментів. Що суттєво зменшує час, який витрачають розробником на ручне створення користувацьких інтерфейсів. JFormDesigner має простий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє швидко освоїтися новим користувачам. Засіб сумісний з такими інтегрованими середовищами розробки, як: Eclipse, IntelliJ IDEA, NetBeans, JDeveloper.

4.1.4 Стандарти і технології взаємодії між компонентами системи

Сучасні системи управління гібридними системами енергопостачання базуються на використанні контролерів. Інформація отримана з датчиків передається через контролери до комп'ютеризованих систем, де обробляється і відображається оператору в інтуїтивно-зрозумілому вигляді. Використання технологія OLE (Object Linking and Embedding) дозволяє полегшити розробку системи такого типу. OLE 1.0 розроблена компанією Microsoft в 1990 році. Головна задача OLE – це організація взаємодії між різними офісними програми. OLE дозволяє використовувати об'єкти, що були створені в одній програмі, іншими. Починаючи з версії OLE 2.0 підтримується стандарт COM (*Component Object Model*).

На основі технологій OLE, COM, DCOM розроблено набір стандартів OPC (*OLE for process Control*). Стандарти OPC визначають стандартний набір об'єктів, інтерфейсів, методів та підходів для використання в програмах управління процесами та автоматизації виробництва з метою полегшення організації взаємодії між різними компонентами системи [113].

Дана технологія визначає два класи програм:

- *OPC-сервер*, який безпосередньо відповідає за взаємодію з апаратурою (з контролерами);
- *OPC-клієнт*, який отримує дані з OPC-сервера, а такої передає команди управління на OPC-сервер. Кожен клієнт може під'єднуватися до декількох серверів, а кожний сервер взаємодіяти з декількома клієнтами.

Дотримання стандарту OPC дозволяє організувати взаємодію між апаратними засобами і програмними засобами різних виробників.

OPC складається з таких стандартів [114]:

- *OPC DA (Data Access)* – основний стандарт, що регламентує обмін даними в реальному часі з апаратними засобами.
- *OPC AE (Alarms & Events)* – стандарт, що регламентує способи створення і передачу повідомлень про різні події: аварійні ситуації, дії

оператора, інформаційні повідомлення та інші.

- *OPC Batch* – стандарт розширяє специфікацію OPC DA, що забезпечує можливості управління визначеннями рецептів.
- *OPC DX (Data eXchange)* – стандарт регламентує обмін даними між OPC-серверами через мережу Ethernet.
- *OPC HDA (Historical Data Access)* – стандарт регламентує формати збереження даних і доступу до них.
- *OPC Security* – стандарт регламентує способи організації доступу до OPC-клієнтів і OPC-серверів.
- *OPC XML-DA (XML-Data Access)* – стандарт регламентує обмін даними через SOAP і HTTP.
- *OPC UA (Complex Data)* – стандарт регламентує способи представлення і передачі складних, багато рівневих об'єктів.

Оскільки OPC відкритий стандарт існує безліч його реалізацій на різних мовах програмування, на таких як: C/C++, C#, Java, Visual Basic, Delphi і т.д. На Java можна відзначити такі бібліотеки, які реалізують стандарт OPC, як: Utgard – OPC DA, Unified-automation OPC UA Client, Prosys OPC UA SDK, JEasyOPC. Проте більша частина з них платна, серед безплатних можна виділити Utgard – OPC DA. Utgard – це проект з відкритим кодом, що реалізований на чистій Java, тобто без залежності від JNI чи інших бібліотек DLL. На даний момент підтримується розробка клієнта DA 2.0. В планах, підтримка DA 3.0 стандарту. Utgard використовує бібліотеку j-Interop для DCOM взаємодії. Тому, для реалізації системи підтримки прийняття рішень використано бібліотеку Utgard.

4.2 Архітектори системи підтримки прийняття рішень

Існує безліч визначень поняття «Архітектура програмного забезпечення». Проте, інститут інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) дає таке визначення терміну в стандарті IEEE 1471: архітектура є основною організацією системи, втілена в компонентах

системи, їх взаємодії один з одним, взаємодії з навколишнього середовища, а також принципи, що керують його розробкою та подальшою еволюцією [118].

Стандарт IEEE 1471 не визначає поняття «компонент». Одне з визначень, яке можна дати компоненту системи – абстрактна одиниця інструкцій програмного забезпечення і внутрішніх станів, яка забезпечує взаємодію даних через свої інтерфейси. При розробці ПЗ зазвичай користуються іншим більш вузьким терміном. Компонент системи – це найменша частина системи, яку можна включити або не включити до її складу [119].

Для побудови системи підтримки прийняття рішень (СППР) використано патерн проектування MVC (Model-View-Controller), який дозволяє відділити бізнес-логіку від користувацького інтерфейсу. Що забезпечує високий рівень структурованості коду, полегшує внесення змін в існуючу логіку, або її розширення [115].

Добовий графік електричного навантаження визначається заздалегідь на основі статистичної інформації за попередні дні. В результаті оптимізації енергодинамічних режимів кожній з систем енергопостачання надається диспетчерський графік навантаження на наступну добу. Оператори традиційних систем енергопостачання здатні наперед визначити оптимальні режими роботи (окрім нештатних ситуацій). Троте, у зв'язку з складністю точного прогнозування умов навколишнього середовища, оператори вітрових електричних станції не мають можливості заздалегідь визначити оптимальний режим роботи (активний склад вітрової електричної станції, момент перерахунку активного складу, тощо). Невизначеність параметрів зовнішнього середовища може призвести до незадоволення графіка електричного навантаження. Тому, розробка системи підтримки прийняття рішень, яка б дозволяла управляти енергодинамічними процесами вітрової електростанції в режимі реального часу, є важливою задачею.

На даний момент, важко уявити системи диспетчерського управління, яка б не використовувала програмний пакет для збору, обробки і представлення

даних SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [116]. У сучасних SCADA–системах реалізована повна підтримка стандарту OPC (DA, HDA, A&E, UA). Наявні широкі можливості по представленню даних в зручній для користувача формі, швидкості і легкості розширення існуючого функціоналу, можливості працювати на різних операційних системах.

Система підтримки прийняття рішень, що розроблена відповідно до стандарту OPC, є окремою програмною бібліотекою і може бути інтегрована у сучасні SCADA – системи [117]. Підтримка деякими SCADA–системах інтеграції ActiveX і COM, дає змогу інтегрувати розроблену СППР і тим самим адаптувати SCADA з апаратурою, яка не підтримує стандарт OPC.

Існує безліч мов моделювання, які регламентують візуалізацію архітектури ПЗ, взаємодії компонентів системи на різних рівнях, описують бізнес логіку. Наприклад: UML, IDEF, BPMN (Business Process Model and Notation), Object-Role Modeling (ORM) і інші. Одна найбільш поширених мов моделювання це UML. UML має ряд переваг і недоліків. До переваг можна віднести [120]: відображає об'єктно-орієнтованому підхід; мова включає 14 видів діаграм, що дозволяє описати систему майже на всіх рівнях і точок зору; дозволяє вводити власні текстові та графічні стереотип; наочність мови дозволяє використовувати діаграми для навчання персоналу. До недоліків: UML містить велику кількість надмірних або практично невикористовуваних діаграм і конструкцій; деяка неточність і абстрактність синтаксису UML можуть призводити до неоднозначного трактування специфікації; особливості специфікації ускладнюють роботу з не об'єктно-орієнтованими мовами програмування. Проте, незважаючи на всі недоліки UML залишається потужним інструментом в описі архітектури ПЗ, тому для подальшого опису архітектури системи використано UML.

На Рис. 4.4 представлена діаграма пакетів системи підтримки прийняття рішення. З Рис. 4.4 видно, що система розбита на три компонента відповідно до патерна проектування MVC. В Model (Модель) зібрана логіка роботи з базою

даних. Пакет складається з пакета persistence, який відповідає за підключення до бази даних і трьох пакетів, що відповідають за збереження статистики і даних гібридної вітро-сонячною системи електропостачання.

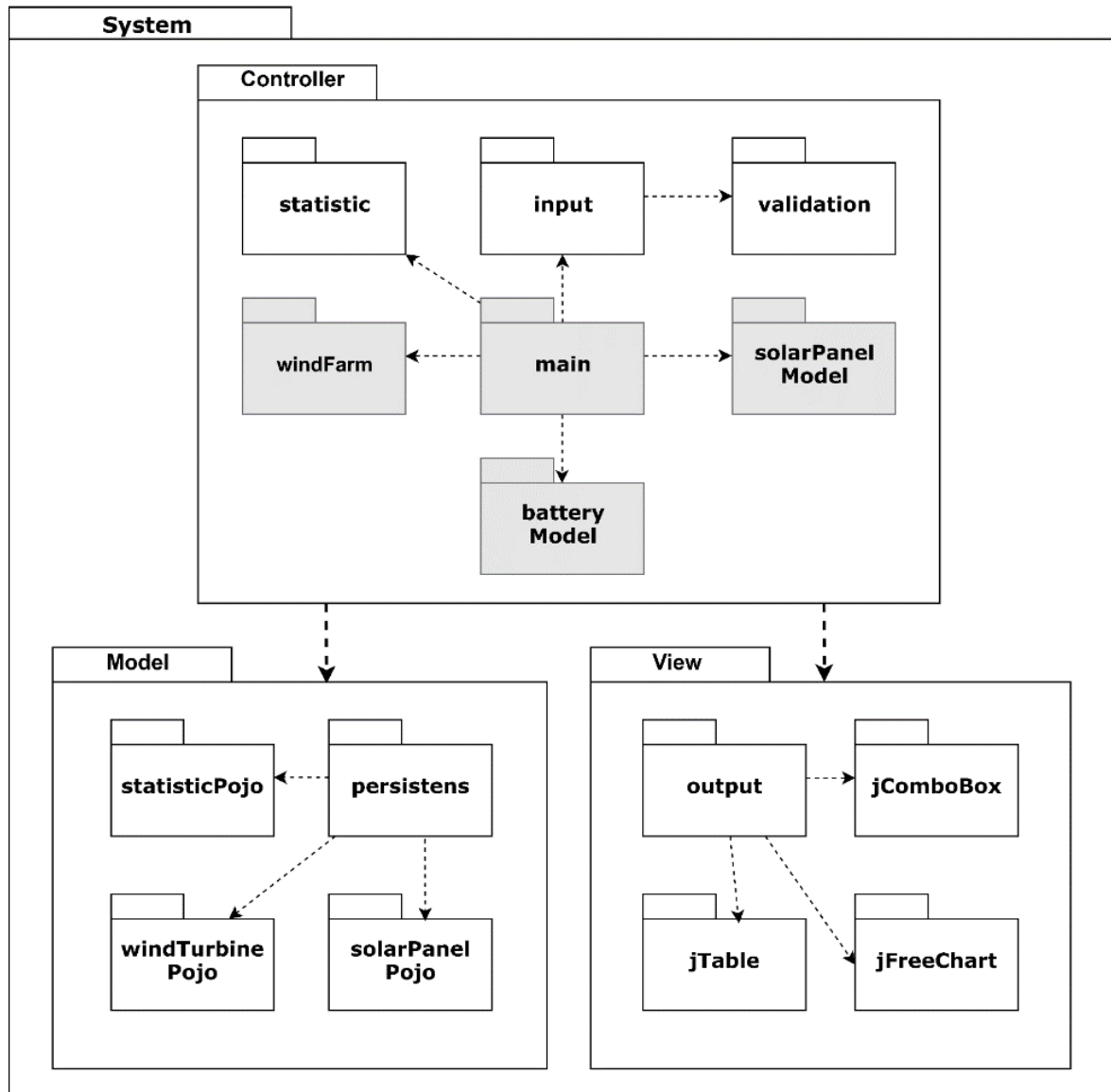


Рис. 4.4 Діаграма пакетів системи підтримки прийняття рішення

View (Відображення) – графічний інтерфейс, що відповідає за відображення статистичних даних, поточних параметрів системи в різних форматах, отримання команд від оператора, відображення повідомлень про помилку, тощо. Складається з чотирьох пакетів. Пакет output це основний пакет, де зібрана основна логіка відображення даних, описано всі компоненти графічного інтерфейсу. Пакети jTable, JFreeChart, jComboBox відповідають за

функціонування таких елементів графічного інтерфейсу, як таблиці, діаграми, випадаючі списки і інші.

В Controller (Контролер) зібрана основна логіка роботи системи, також здійснюється двостороннього зв'язку між View та Model. Цей пакет складається з семи пакетів. Main це основний пакет, який використовує всі інші пакети. Пакет input і validation відповідають за отримання команд оператора і за базову перевірку на коректність отриманих даних відповідно. Пакет *solarPanelModel* представляє собою модель сонячною електричною станцією. Пакет дозволяє спрогнозувати кількість згенеровано електроенергії на основі параметрів станції і статистичних параметрів навколишнього середовища. Математична модель сонячною електричною станцією описана в розділі 2.3.

В пакеті *batteryModel* зібрані класи, що дозволяють моделювати роботу акумулюючого елемента. В пакеті реалізовано декілька математичних моделей АЕ. Параметри АЕ, такі як: енергетична ємність одного елемента, залежність між опором одного елемента і SOC(State of Charge, степінь заряду), залежність між напругою на клеммах при розряді і заряді і SOC, максимальна сила струму заряду-розряду. Зберігаються в базі даних в таблиці «Налаштування системи». Детальніше моделі АЕ описані в розділі 2.2.

В пакеті *statistic* зібрані класи, що відповідають за збір параметрів системи в процесі її роботи і обчислення статистичних параметрів. Збирається інформація про кількість згенерованої електроенергії, набір активних ВЕУ, стан акумулюючого елемента, параметри сонячних панелей, тощо. Для зменшення залежностей між пакетами використано елементи аспектно-орієнтоване програмування (aspect-oriented programming, AOP). AOP дозволяє зосередити всю логіку збору статистики в межах одного пакета (або класу), що також значно полегшує внесення змін в існуючу логіку збору статистики.

В пакеті *windFarm* забрана логіка моделювання роботи вітрової електричною станцією. Цей пакет складається з п'яти пакетів.

Один з них *windFarmModel*, що містить математичну модель вітрової

електричної станції, а також в якому реалізовано методи визначення коефіцієнту ефективності ВЕУ (K_{Σ}) і коефіцієнту ефективності набору ВЕУ. За замовчуванням, для визначення коефіцієнту ефективності ВЕУ використовується адитивна функція:

$$K_{\Sigma} = w_1 \bar{K}_1 + w_2 \bar{K}_2 + \dots + w_m \bar{K}_m \quad (4.1)$$

де m – номер параметра, w_m – значення m -го вагового коефіцієнта, \bar{K}_m – нормалізоване значення параметра m -го параметра ВЕУ. Реалізований також спосіб визначення K_{Σ} за допомогою середньо степеневого підходу (4.2) і за допомогою сумуванням квадратів оцінок (4.3):

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M w_m \bar{K}_m \quad (4.2)$$

$$K_{\Sigma} = \sqrt{(w_1 \bar{K}_1)^2 + (w_2 \bar{K}_2)^2 + \dots + (w_m \bar{K}_m)^2} \quad (4.3)$$

Нормалізації параметрів вітрових електричних установок до інтервалу $[\alpha, \beta]$ відбувається за допомогою співвідношення:

$$\bar{K}_m = \frac{K_m - K_m^-}{K_m^+ - K_m^-} (\beta - \alpha) + \alpha \quad (4.4)$$

де K_m – значення m -го параметра, K_m^+ – максимальне значення m -го параметра, K_m^- – мінімальне значення m -го параметра.

Коефіцієнт ефективності набору ВЕУ (K_{set}) визначається на основі критерію ефективності всіх ВЕУ, що входять в набір. За замовчуванням, використовується співвідношення:

$$K_{set} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i K_{\Sigma i}}{\sum_{i=1}^N b_i} \quad (4.5)$$

де b_i – бінарна величина, яка показує включена i -ї ВЕУ у набір ($b_i = 1$), чи ні ($b_i = 0$), $K_{\Sigma i}$ – коефіцієнт ефективності i -ї ВЕУ, N – загальна кількість ВЕУ.

Проте, при постановці задача знаходження активного складу ВЕС як класичну задачу пакування рюкзака, K_{set} визначатися за допомогою співвідношення (4.6):

$$K_{set} = b_1 K_{\Sigma 1} + b_2 K_{\Sigma 2} + \dots + b_i K_{\Sigma i} \quad (4.6)$$

Вагові коефіцієнти обчислюються в пакеті saaty. Вагові коефіцієнти можуть завдаватися в векторній формі, тоді пакет saaty здійснює тільки їхню нормалізацію. Проте, у випадку коли задана експертна матриця попарних порівнянь (A), її необхідно перетворити в вектор вагових коефіцієнтів і для цього використовується повного методу Сааті [121]. Метод складається з чотирьох етапів:

1. Знаходження власного значення матриці (λ). Число λ називається власним значенням матриці (визначник матриці) за умови $Aw = \lambda w$ при $w \neq 0$. Вектор w називається – власним вектором.

2. Підготовка матриці попарних порівнянь. Для цього необхідно підставити знайдене власне значення λ в матрицю A . Отримаємо A' :

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

3. Розв'язання системи лінійних рівнянь A' за допомогою методу Гауса. Також можна використати і інші методи, такі як: метод Холецкого, метод прогонки та далі. Після розв'язку отримаємо вектор вагових коефіцієнтів.

4. Нормалізація вектора вагових коефіцієнтів.

Методи визначення активного складу ВЕС знаходяться в пакетів knapsack. В класі *BranchAndBound* реалізований методі гілок і меж. Метод гілок і меж – це один з комбінаторних методів. Суть його полягає в пошуку оптимального рішення шляхом упорядкованого перебору тільки тих варіантів, для яких виявляються певні умови. Задача вирішується використанням наступного алгоритму:

```
void optimal(BitSet optimalSet, int index, double profitSum, double weightSum, int size){
    double generalProfit = calcGeneralProfit(weightOfKnapsack, profitSum, weightSum, size);
    if (generalProfit > maxProfit) { // перевіряємо чи значення цільової функції більше ніж
        maxProfit = generalProfit; // максимальне знайдене до того, якщо так зберігаємо його
    }
    if(weightSum < weightOfKnapsack * 1.5 && index < set.size()){
        optimalSet.set(index, true);
        optimal(optimalSet, index + 1, profitSum + calcGetProfit(set.get(index)),
            weightSum + assessment.getWeight(set.get(index)), size + 1);
        optimalSet.set(index, false);
        optimal(optimalSet, index + 1, profitSum, weightSum, size);
    }
}
```


Клас *DynamicProgramming* дозволяє знайти активний склад ВЕС за допомогою класичного методу динамічного програмування при постановці задачі визначення активного складу як класичну задачу пакування рюкзака. Тобто, для того щоб знайти активний склад ВЕС необхідно знайти такий набір ВЕУ, щоб сумарна потужність ВЕУ набору була менша або рівна ніж потужність, яку треба згенерувати, а коефіцієнт ефективності набору – максимальним. Тобто:

$$b_1 p_1 + b_2 p_2 + \dots + b_i p_i \leq P \quad (4.8)$$

де i – порядковий номер ВЕУ, b_i – бінарна величина, яка показує включена i -ї ВЕУ у набір ($b_i = 1$), чи ні ($b_i = 0$), p_i – потужність i -ї ВЕУ, P – потужність, яку треба згенерувати. Цільова функція має вигляд:

$$b_1 K_{\Sigma 1} + b_2 K_{\Sigma 2} + \dots + b_i K_{\Sigma i} \rightarrow \max \quad (4.9)$$

де $K_{\Sigma i}$ – коефіцієнт ефективності i -ї ВЕУ.

Проміжні результати роботи динамічного програмування зберігаються в табличній форма. Розмірність таблиці $P \times N$, де P – потужність, яку треба згенерувати, N – загальна кількість ВЕУ. В клітинках матриці зберігаються максимальні значення цільової функції для задач меншої розмірності. Наприклад, в клітинці [4;5] зберігається максимальне значення цільової функції при умові, що необхідно згенерувати потужність рівну 5 при наявності тільки перших 4 ВЕУ. Матриця заповнюється рядами починаючи з першого. При заповненні клітинки $[n;p]$ порівнюються значення цільової функції при включенні i -ї ВЕУ в набір і при не включенні, тобто значення $[n-1;p]$ і $[n-1;p-p_i] + K_{\Sigma i}$, де p_i – потужність i -ї ВЕУ, $K_{\Sigma i}$ – коефіцієнт ефективності i -ї ВЕУ. Більше значення заноситься в клітинку $[n;p]$. Цей процес проілюстрований на Рис. 4.5.

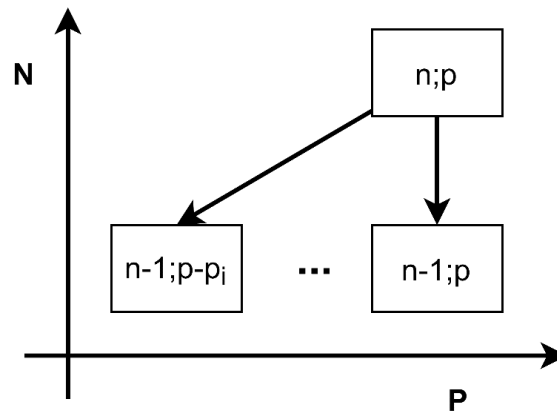


Рис. 4.5 Схема розрахунку значень елементів матриці

В загальному випадку, складність динамічного програмування рівна $O(P \cdot N)$. Також, в класі реалізована можливість зміни кроку між колонами, за замовчуванням крок складає 1. Зміна кроку дозволяє зменшити складність, за рахунок зменшення точності обчислень.

Клас *ModificationDynamicProgramming* реалізує алгоритм розв'язку задачі пакування рюкзака за допомогою модифікації методу динамічного програмування [7]. Ідея методу полягає в зміні обмежень і цільової функції таким чином, щоб мінімізувати відхилення і максимізувати ефективність ВЕС. Цільова функція має вигляд:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N b_i p_i - P \quad (4.10)$$

$$W(\Delta P, K_{set}) = a_1 K_{set} + a_2 (1 - \Delta P) \rightarrow \max \quad (4.11)$$

де ΔP – середнє відхилення потужності (середня різниця між потужністю навантаження та можливостями генерації енергії активним складом ВЕС), $W(\Delta P, K_{set})$ – цільова функція, K_{set} – коефіцієнт ефективності набору, визначається за допомогою співвідношення (4.5).

Клас *GeneticAlgorithm* дозволяє знайти активний склад ВЕС за допомогою генетичних алгоритмів. В класі використана бібліотека *Jenetics* [122], де реалізовано основні методи для роботи з генетичними алгоритмами. Бібліотека *Jenetics* надає широкі можливості щодо налаштування параметрів генетичного алгоритму, таких як: критерії зупинки, розмір і спосіб генерації початкової популяції, метод відбору, оператор схрещування і мутації. В ній реалізовано такі

методи відбору, як:

- відбір Больцмана (Boltzmann);
- лінійно ранговий відбір (Linear rank selector);
- експоненціально ранговий відбір (Exponential rank selector);
- відбір за допомогою методу Монти-Карло (Monte-Carlo selector);
- відбір за методом рулетки (Roulette wheel selector);
- стохастичний універсальний відбір (Stochastic universal selector);
- турнірний селектор (Tournament selector);
- відбір урізанням (Truncation selector);

Реалізовано такі оператори схрещування, як:

- одноточкове схрещування (Single point crossover);
- багатоточкове схрещування (Multi point crossover);
- однорідне схрещування (Uniform crossover);

А також, два оператора мутації однорідний мутатор (Uniform mutator) і мутація обміном (Swap mutator). Існує можливість використовувати комбінації з кількох мутаторів.

Клас *NeuralNetworks* дозволяє знайти активний склад ВЕС за допомогою повнорекурентних нейронних мереж. В класі реалізовано три парадигми навчання:

- без вчителя;
- із вчителем, роль якого виконує метод повного перебору;
- із вчителем, роль якого виконує модифікований метод динамічного програмування (МДП).

Оскільки дослідження використання повнорекурентних нейронних мереж показало, що топологія РНМ з одним прихованим шаром показує кращі результати, в класі *NeuralNetworks* реалізовано саме цю топологію. На вхідний шар мережі передаються 3 масиви даних:

- миттєва потужність ВЕУ;
- коефіцієнт ефективності ВЕУ;

- графік навантаження;

Наступний шар – це шар об'єднання вхідних даних. Як функції активації вхідного і прихованого шара використано ReLU [123]. Останні два шари РНМ перетворюють виходи РНМ в дискретні значення, що є однією з вимог для знаходження активного складу ВЕС. Як функції активації використано sigmoid і tanh [101]. Останнім є вихідний шар.

Пакет knapsack використовує пакет needPacking для визначення моменту перемикання активного складу ВЕС і пакет windTurbineModel для моделювання роботи вітрових електричних установок.

Схема бази даних СППР представлена на рис. 4.6. База складається з таких основних таблиць, як: «Вітрові електричні установки», «Сонячна електрична станція», «Акумуляуючий елемент», «АЕ статистика», «Загальна статистика», «Статистика наборів ВЕУ», «Параметри зовнішнього середовища», «Параметри системи».

Таблиця «Вітрові електричні установки» містить основні параметри установки (модель, номінальна потужність, діаметр ротора, мінімальна та максимальна швидкість вітру, залежність між швидкістю вітру і потужністю ВЕУ, тощо), параметри, які використовуються для визначення ефективності ВЕУ (кількість включень/виключень, кількість виробленої енергії, технічний стан, час).

В таблиці «Сонячна електрична станція» зберігаються технічні параметри сонячної електричної станції, такі як: загальна площа панелей, кут нахилу панелей, їхня орієнтації відносно півдня, коефіцієнт корисної дії, тощо.

В таблиці «Акумуляуючий елемент» зберігаються технічна інформація про акумуляуючий елемент (АЕ), а саме: номінальна енергетична ємність АЕ, степінь заряду АЕ, коефіцієнт корисної дії АЕ.

В таблиці «АЕ статистика» зберігаються відомості про технічний стан (кількість повних зарядів-розрядів), поточна ємність АЕ.

Таблиця «Загальна статистика» зберігаються статистичні дані про роботу

системи: кількість згенерованої енергії, необхідна кількість енергії, яка частка енергії згенерована ВЕС, загальна кількість перемикань, кількість повних зарядів-розряді АЕ, тощо.

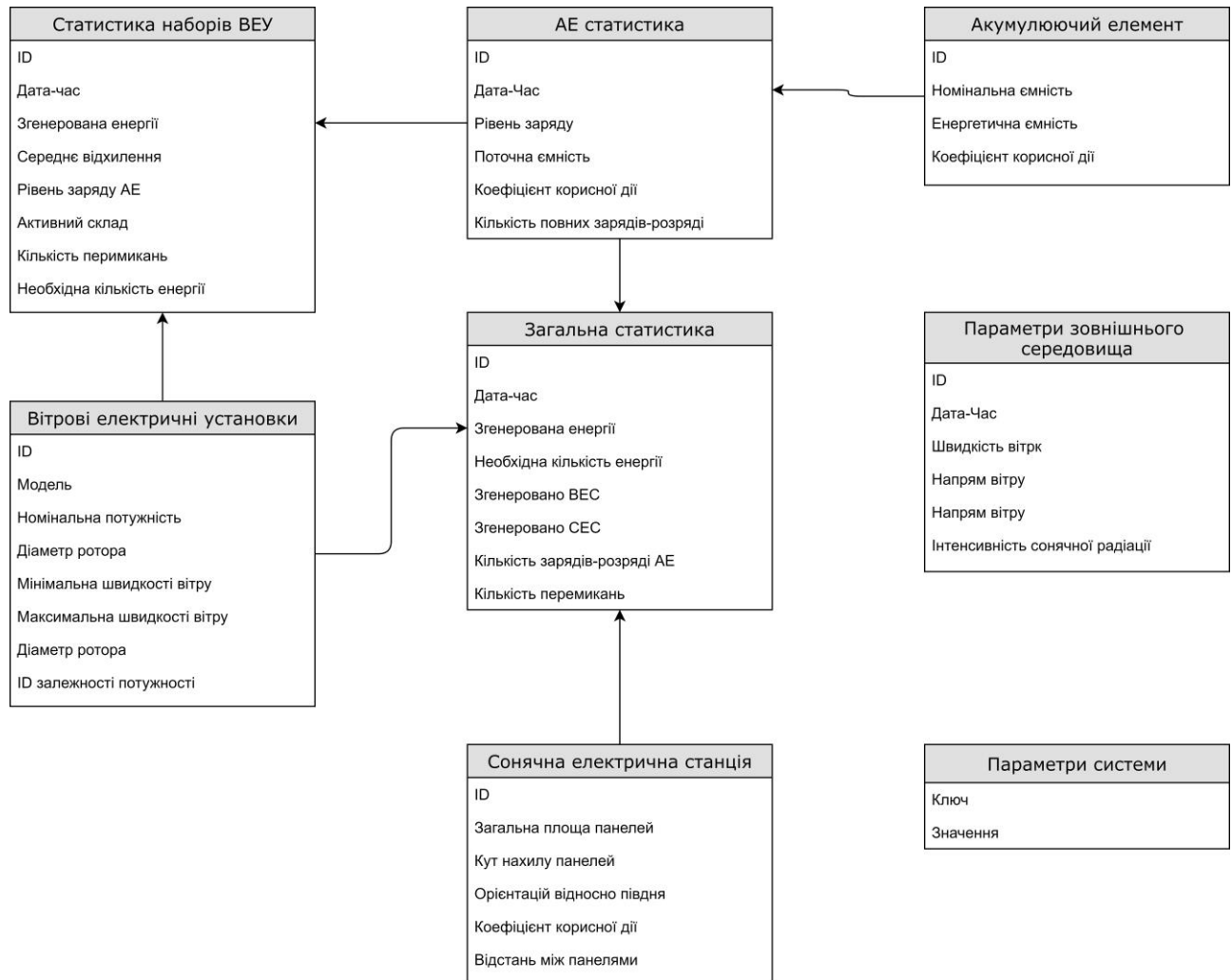


Рис. 4.6 Схема бази даних системи підтримки прийняття рішень

В таблиці «Статистика наборів ВЕУ» зберігається більш детальна інформація про роботу ВЕС. Вона містить статистику про роботу ВЕС між перемиканнями, таку як: кількість згенерованої електроенергії, необхідну кількість енергії, рівень заряду АЕ, активний склад ВЕС, тощо. Ця інформація дає змогу аналізувати роботу системи в певних часових проміжках.

Табличка «Параметри системи» зберігає налаштування системи, константи, які використовують деякі методи в роботі, різні залежності (залежність між опором АЕ і SOC, тощо). Всі дані зберігаються в форматі ключ-значення. Для збереження послідовностей даних використовуються формат JSON. Приклад

формату JSON представлений на рис. 4.7.

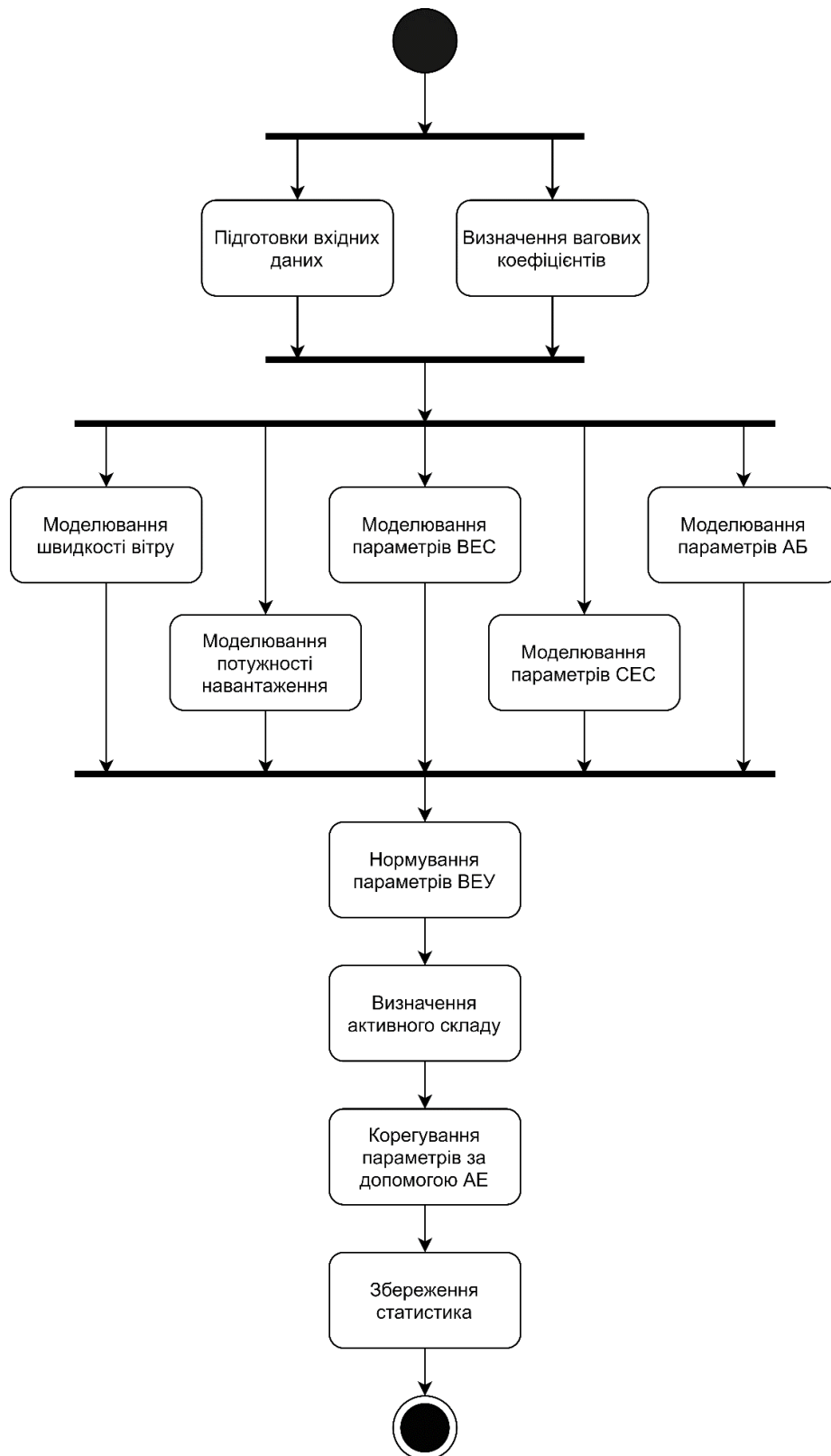


Рис. 4.7 Діаграма діяльності системи підтримки прийняття рішень

```

{"widget": {
  "debug": "on",
  "window": {
    "title": "Sample Konfabulator Widget",
    "name": "main_window",
    "width": 500,
    "height": 500
  },
  "image": {
    "src": "Images/Sun.png",
    "name": "sun1",
    "hOffset": 250,
    "vOffset": 250,
    "alignment": "center"
  }
}
}

```

Рис. 4.8 Приклад формату JSON

Таблиця «Параметри зовнішнього середовища» зберігає інформацію про зовнішню середовище, такі як: швидкість вітру, напрям вітру, інтенсивність сонячної радіації, тощо. Інформація зберігається з заданою періодичністю.

З метою проілюструвати послідовність кроків, які відбуваються в системі підтримки прийняття рішень на Рис. 4.7 представлена діаграма діяльності.

4.2.1 Модель збору та попередньої обробки інформації

Одним з елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридної системи є процес збору і попереднього опрацювання інформації.

Для управління такою системою необхідно забезпечити збір даних з кожного з елементів гібридної вітро-сонячної системи електропостачання (вітрових електричних установок, сонячних панелей, акумулюючого елемента), даних про параметри зовнішнього середовища (середня швидкість вітру, інтенсивність сонячної радіації, метеопрогноз). Зібрані дані необхідні для формування управлінських рішень управління енергодинамічними потоками.

При зборі і попередньому опрацюванні даних необхідно враховувати різну частоту оновлення даних. У зв'язку з особливостями передачі даних контролерами, дані від контролерами можуть передаватися через силові кабелі,

або дані можуть передаватися через сервера виробників обладнання, що може призводити до деяких затримок. Дані метеопрогнозу оновлюються з найменшою частотою раз в день. З цією метою, реалізована окрема функція, що дозволяє парсити (parsing – розбір) дані з зовнішніх джерел. У процесі парсингу даних метеопрогнозу проводиться перевірка на коректність і їх попередня обробка.

Дані надходять від чотирьох джерел: давачів; диспетчера мережі; оператор гібридної системи; сервісів прогнозування погоди. Дані з перших двох джерел додатково перевіряються і обробляються. Після чого, передаються для збереження в базу даних, під-систему візуалізації поточного стану системи і в блок управління. В свою чергу, команди отримані від оператора гібридної системи напряду передаються для збереження в базу даних і в блок управління без попередньої обробки.

В результаті частина отриманих даних з давачів і зовнішніх джерел зберігаються в базі даних та можуть бути представлені оператору гібридної системи. Дані про параметри зовнішніх умов зберігаються з заданою дискретністю, це необхідно для зменшення навантаження на базу даних і зменшення об'ємів даних. На Рис. 4.9 представлена схема збору і обробки даних інформаційною технологією підтримки прийняття рішень.

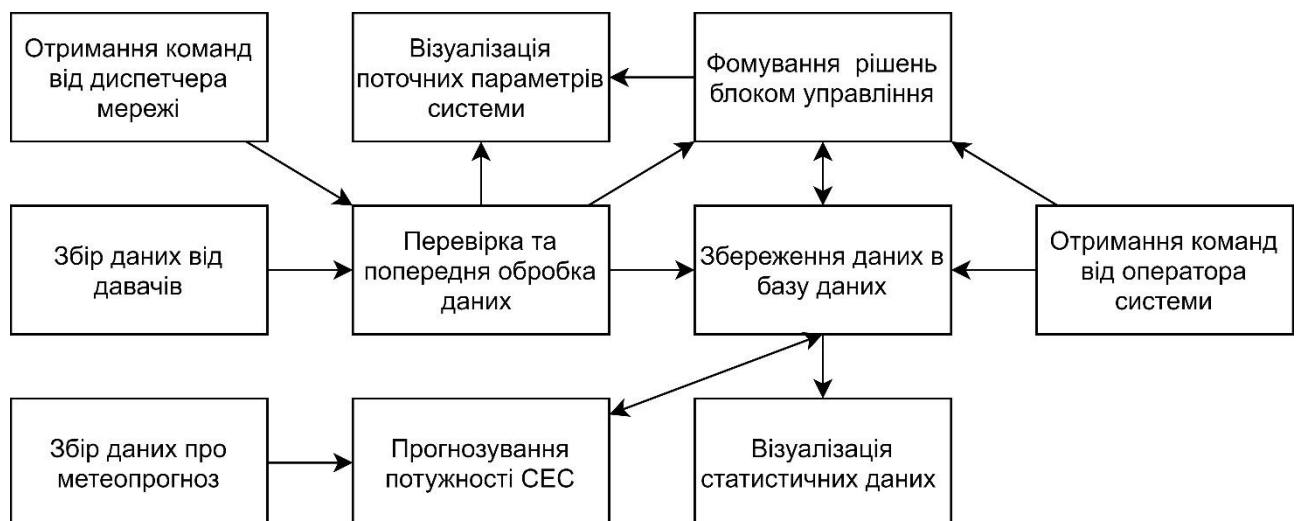


Рис. 4.9 Схема збору і обробки даних інформаційною технологією підтримки прийняття рішень

Для отримання даних з різних джерел використовуються різні стандарти. На рис 4.10 наведено схему взаємодії зовнішніх компонентів з СППР. Як можна помітити взаємодія з контролерами ВЕУ, СП і АЕ відбувається з використанням стандарту OPC UA. А взаємодія з диспетчером мережі з використанням стандарту IEEE C37.118 використання якого вимагається стандартом [29].

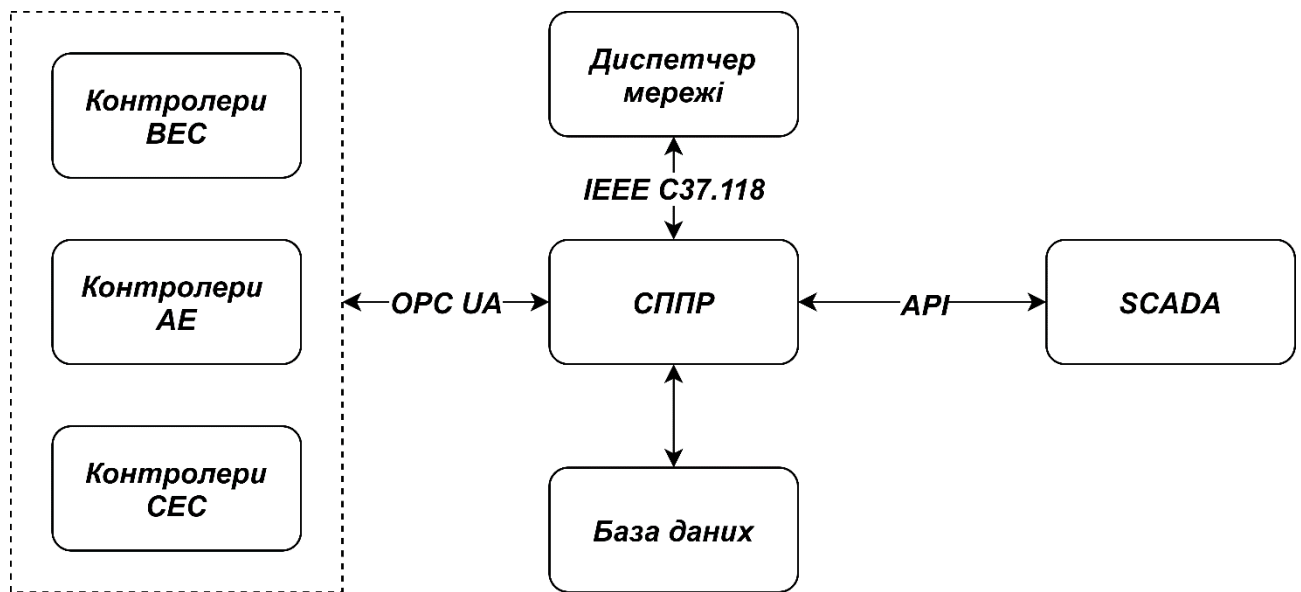


Рис. 4.10 Схема взаємодії зовнішніх компонентів з СППР

4.3 Статистичний аналіз отриманих результатів

Для оцінки ефективності роботи інформаційної технології підтримки прийняття рішень, використано елементи теорію ймовірності та математичної статистики. Проведено статистичний аналіз і визначено декілька видів статистичних показників. Статистичний показник – це узагальнююча характеристика соціально-економічного явища чи процесу, в якій поєднуються якісна та кількісна визначеність останнього. Статистичні показники можна поділити на види за різними ознаками.

За ознакою часу показники поділяються на інтервальні та моменті. Інтервальні характеризують явище за певний період часу: наприклад, середня народжуваність, середнє споживання електроенергії одним домогосподарством. Моменті показники характеризують явище за станом на певний момент часу:

наприклад, кількість виробленої електроенергії альтернативними джерелами.

За способом виконання своїх функцій розглядають показники, що відбивають обсяг явища, його середній рівень, інтенсивність прояву, структуру, зміну в часі або порівнянні у просторі [124].

Зазвичай в статистиці узагальнюючі показники поділяють на три типи [125]:

- абсолютні та відносні величини;
- середні величина;
- показники варіації.

Абсолютні величини – це кількісні показники, які визначають рівень, обсяг, чисельність явищ або процесів. Під відносними величинами розуміють узагальнюючі кількісні показники, які виражають співвідношення порівнюваних абсолютних величин. До абсолютних та відносних статистичних показників відносять:

1) Розмах варіації:

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (4.12)$$

де X_{max} – максимальне значення параметра, – мінімальне значення параметра. Цей показник не є цілком надійним, оскільки базується всього на двох крайніх значеннях, одне з яких є випадковим.

Середні величини – це кількісний показник, що характеризує узагальнене значення варіюючої ознаки одиниць сукупності [125].

2) Середнє лінійне відхилення:

$$l = \frac{\sum |x - \bar{x}|}{n} \quad (4.13)$$

де x – поточне значення параметра; \bar{x} – середнє значення параметра; n - кількість значень. Ця характеристика ілюструє наскільки в середньому значення відхиляються від середньої величини.

3) Дисперсія (середній квадрат відхилення):

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n} \quad (4.14)$$

4) Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.15)$$

5) Математичне сподівання дискретного розподілу:

$$M|Z| = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i \quad (4.16)$$

де x_i – величина, p_i – ймовірність появи величини.

Показники варіації – це показники, що характеризують зміну значень ознаки у одиницях сукупності в один момент часу або протягом періоду. Далі представлені показники варіації.

6) Лінійний коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{l}{\bar{x}} * 100\% \quad (4.17)$$

7) Квадратичний коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\% \quad (4.18)$$

Коефіцієнт варіації визначається в відсотках і показує на скільки в середньому індивідуальні значення варіантів відхиляються від середнього значення.

Використовуючи описані вище статистичні показники, досліджено ефективність роботи розробленої системи досліджено за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання. Для цього проведено ряд експериментів, результати яких зберігалися в базу даних і в подальшому оброблялися.

Для комп'ютерного моделювання підготовлено два набори вхідних даних, для січня і червня. Набір даних швидкості вітру і інтенсивності сонячної радіації отримані з метеостанції [127] за 2019 рік. Перевагами цієї метеостанція є розташована близько до Львова, вимірювання як швидкість вітру так і інтенсивність сонячної радіації.

До складу гібридної системи також входить АЕ з ККД 95% і максимальною силою струму заряду-розряду $2C$, де C – номінальна ємність АЕ в A^* год. Симуляцію проведено для різної енергетичною ємність АЕ від 0 МВт^* год до 100

МВт*год. Середнє навантаження споживачів прийнято на рівні 10 МВт.

Таблиця 4.1 Основні технічні характеристики V52/850

Параметри	Значення
Виробник	Vestas
Максимальна потужність, кВт	850
Діаметр ротора, м	52
Площа ротора, м ²	2124
Стартова робоча швидкість, м/с	3
Номінальна швидкість вітру, м/с	14
Максимальна робоча швидкість м/с	25
Мінімальна швидкість обертання ротора, об/хв	14
Максимальна швидкість обертання ротора, об/хв	31,4

Моделювання проведена для декількох конфігурацій гібридної системи. Конфігурації відрізняються різною кількістю ВЕУ і площею СП. Гібридна система складається тільки з ВЕУ типу V52/850, основні технічні характеристики яких наведено у таблиці 4.1. Для визначення активного складу використані генетичні алгоритми. Просторові параметри і технічні характеристики сонячних панелей наведено в Таблиця 4.2. Досліджувані конфігурації гібридної системи наведено в

Таблиця 4.3.

Таблиця 4.2 Просторові параметри і технічні характеристики СП

Параметри	Значення
Тип сонячної панелі	полікристалічні
Відношення висоти рядів СП і відстані між рядами	1,7
Коефіцієнт корисної дії, %	15
Кут нахилу сонячних панелей, градуси	35
Азимут, градуси	180

Таблиця 4.3 Конфігурації гібридної системи електропостачання

Назва конфігурації	Кількість ВЕУ	Кількість СП
«60/85»	60 установок	850 000 м ²
«75/68»	75 установок	680 000 м ²
«75/85»	75 установок	850 000 м ²
«75/102»	75 установок	1 020 000 м ²
«90/85»	90 установок	850 000 м ²

Основна конфігурація це «75/85». Ця конфігурація вибрана таким чином, щоб критерій відносної надлишковості згенерованої електроенергії (The Relative Excess Power Generated, REPG) становив близько 1.5 для січні і червня. REPG можна визначити як відношення суми згенерованої електроенергії при відсутності обмежень на генерацію до суми необхідної споживачу електроенергії. Тобто:

$$\text{REPG} = \frac{\sum_{i=1}^T E_{gen}(t)}{\sum_{i=1}^T E_L(t)} \quad (4.19)$$

де T – загальний час електропостачання; E_{gen} – електроенергії, яка могла бути згенерована при відсутності обмежень на генерацію, в час t ; E_L – необхідна споживачу електроенергії в час t . Інші конфігурації отримані шляхом зменшення/збільшення на 20% кількості ВЕУ або площі СП. Результати моделювання роботи гібридної системи електропостачання для січня представлені в Таблиця 4.4, а для червня в Таблиця 4.5.

Таблиця 4.4 Результати моделювання роботи ГВССЕ для січня

Смність АЕ, МВт*год	0	10	20	40	70	100
Статистичні показники						
Розкид відхилень ΔP (МВт)	[-10;1,2]	[-10;0,9]	[-10;0,8]	[-10;0,7]	[-10;0,5]	[-10;0,5]
Відношення розкиду відхилень ΔP	[-	[-100;9]	[-100;8]	[-100;7]	[-100;5]	[-100;5]

до заданої потужності (%)	100;12]					
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,5260	0,5135	0,5156	0,5085	0,4972	0,4980
Середнє відхилення ΔP (кВт)	4320,0	3918,6	3744,1	3465,8	3192,2	2994,6
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	43,200	39,186	37,441	34,658	31,922	29,946
Дисперсія відхилення ΔP	$3,73 \cdot 10^7$	$3,43 \cdot 10^7$	$3,28 \cdot 10^7$	$3,03 \cdot 10^7$	$2,75 \cdot 10^7$	$2,56 \cdot 10^7$
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	61,053	58,602	57,291	55,083	52,475	50,616

Таблиця 4.5 Результати моделювання роботи ГВССЕ для червня

Ємність АЕ, МВт*год	0	10	20	40	70	100
Статистичні показники						
Розкид відхилень ΔP (МВт)	[-10;0,5]	[-10;0,5]	[-10;0,5]	[-10;0,5]	[-10;0,5]	[-10;0,5]
Відношення розкиду відхилень ΔP до заданої потужності (%)	[-100;5]	[-100;5]	[-100;5]	[-100;5]	[-100;5]	[-100;5]
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,4606	0,4698	0,4664	0,4667	0,4651	0,4713
Середнє відхилення ΔP (кВт)	5938,35	5445,80	5029,95	4204,02	3043,28	1934,62
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення ΔP (%)	59,384	54,458	50,300	42,040	30,433	19,346
Дисперсія відхилення ΔP	$5,68 \cdot 10^7$	$5,22 \cdot 10^7$	$4,79 \cdot 10^7$	$3,92 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$
Квадратичний коефіцієнт варіації ΔP (%)	75,333	72,260	69,181	62,589	51,950	39,262

Значення критерія REPG і сумарна генерація ВЕУ і СП для різних конфігурацій гібридної системи наведено в Таблиця 4.6.

Таблиця 4.6 Сумарна генерація ВЕУ і СП для різних конфігурацій ГВССЕ

Назва конфігурації	REPG		Генерація без обмежень ВЕУ, МВт*год		Генерація без обмежень СП, МВт*год	
	Січень	Червень	Січень	Червень	Січень	Червень
«60/85»	1,254	1,417	7583	2096	1393	8106
«75/68»	1,482	1,265	9479	2620	1115	6485
«75/85»	1,510	1,490	9479	2620	1393	8106
«75/102»	1,559	1,715	9479	2620	1672	9727
«90/85»	1,786	1,563	11374	3144	1393	8106

Також, в процесі моделювання визначено залежність між енергетичною ємністю АЕ і відносним дефіцитом електроенергії (Deficiency of Power Supply Probability, DPSP) [22] для різних періодів моделювання. DPSP відображає імовірність повного втрати можливості до забезпечення енергією потреб споживача. Визначається як відношення сумарного дефіциту до суми необхідної споживачу електроенергії. Тобто:

$$DPSP = \frac{\sum_{i=1}^T DPS(t)}{\sum_{i=1}^T E_L(t)} \quad (4.20)$$

$$DPS(t) = E_{gen}(t) - E_L(t) \quad (4.21)$$

Отримана залежність наведена на Рис. 4.11 і Рис. 4.12. Залежність на Рис. 4.11 можна умовно розбити на два відрізка від 0 до 1 год і від 1.6 до 10. На першому відрізку різко падає значення параметра DPSP, що переходить в плавніше падіння після 1.6 год. Також, можна помітити, що конфігурація «75/102» і «60/85» показали кращу результати ніж «75/68» і «75/102». Незважаючи на те, що комбінації «75/68» і «75/102» здатні згенерувати на 15-20% більше електроенергії при відсутності обмежень (таблиця 4.6).

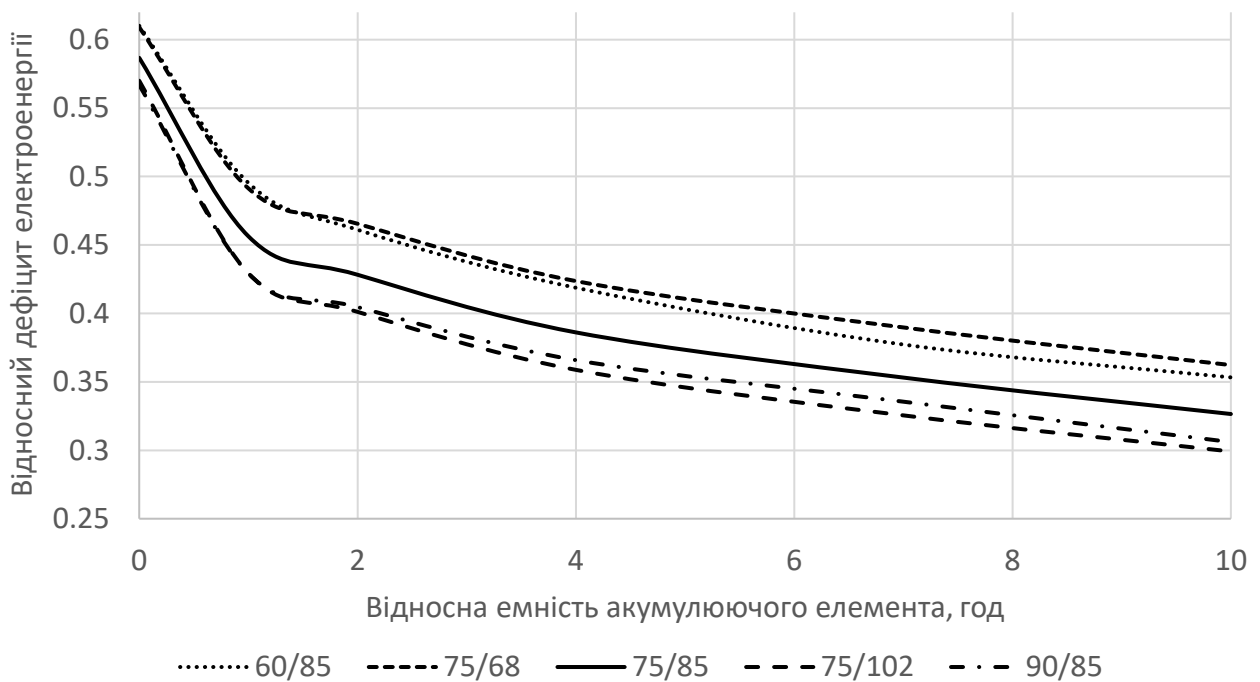


Рис. 4.11 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і ймовірність втрати живлення (DPSP) для січня

Отримана залежність дозволяє проілюструвати необхідність в визначенні оптимального співвідношення між різними джерелами електропостачання в межах гібридної системи електропостачання. На Рис. 4.12 представлена отримана залежність для червня. Для червня основним джерелом електроенергії є СП, що можуть згенерувати майже в 3 рази більше електроенергії за відсутності обмежень ніж ВЕУ. Отримані залежності майже лінійні, це пов'язано з

особливостями енергетичного потенціалу сонця. Також, слід звернути увагу, що середня швидкість вітру для червня становить 2.9 м/с. Це означає, що протягом значного періоду часу ВЕУ не вироблятимуть електроенергію, оскільки швидкість вітру менша ніж стартова швидкість роботи ВЕУ.

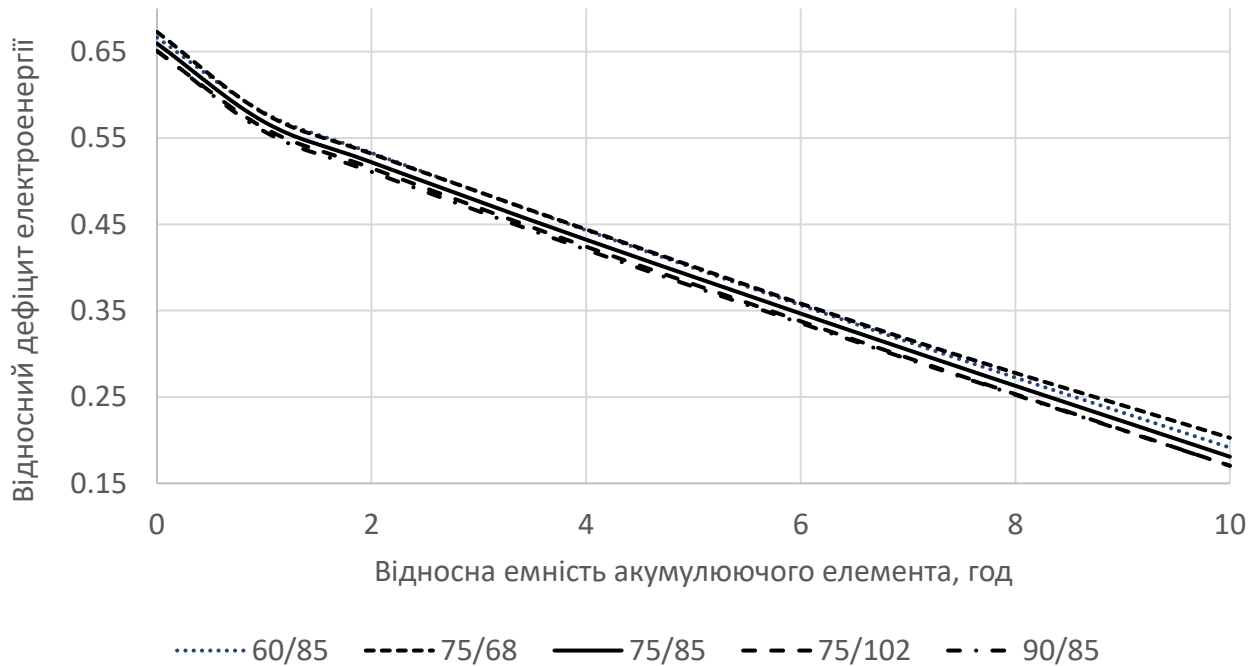


Рис. 4.12 Залежність між енергетичною ємністю АЕ і ймовірність втрати живлення (DPSP) для червня

Відсутність обмежень на перемикач (включень/виключень) ВЕУ в алгоритмі блока управління, що описаний в розділі 2.1, за деяких умов призводить до високої частоти перемикач ВЕУ. Ця ситуація виникає у випадку швидкій зміні швидкості вітру при відсутності або при малій генерації електроенергії СП і повністю зарядженому, або розрядженому АЕ. В такому разі, блок управління може змінювати рівень генерації електроенергії гібридною системою тільки за рахунок зміни активного складу ВЕС, що призводить до великої кількості перемикач ВЕУ і як наслідок до швидкого зносу деяких елементів і агрегатів ВЕУ. Для усунення цього недоліка введено мінімальний інтервал між визначеннями активного складу. Проте, введення такої затримки негативно впливає на параметри роботи гібридної системи, збільшує розкид небалансу потужностей. На Рис. 4.13 наведена залежність між мінімальним

інтервалом між визначеннями активного складу ВЕС і збільшенням середнього відхилення потужності.

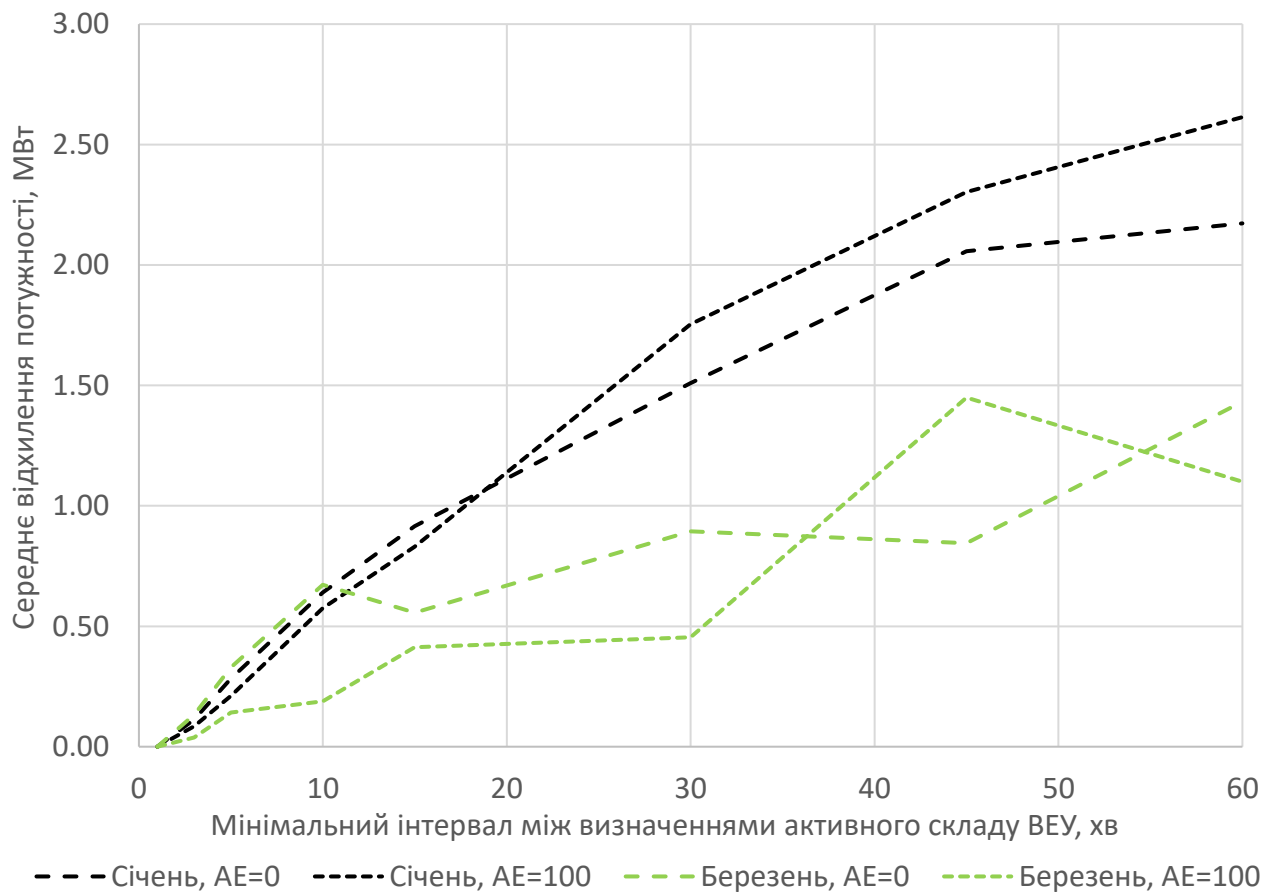


Рис. 4.13 Залежність між мінімальним інтервалом між визначеннями активного складу ВЕС і середнім відхиленням потужності

З метою дослідження впливу проведено імітаційне моделювання з різними мінімальними значеннями затримки між визначеннями активного складу. Отримана залежність між мінімальним інтервалом між визначеннями активного складу ВЕС і кількістю включень/виключень, що припадає на одну ВЕСУ протягом дня наведена на Рис. 4.14.

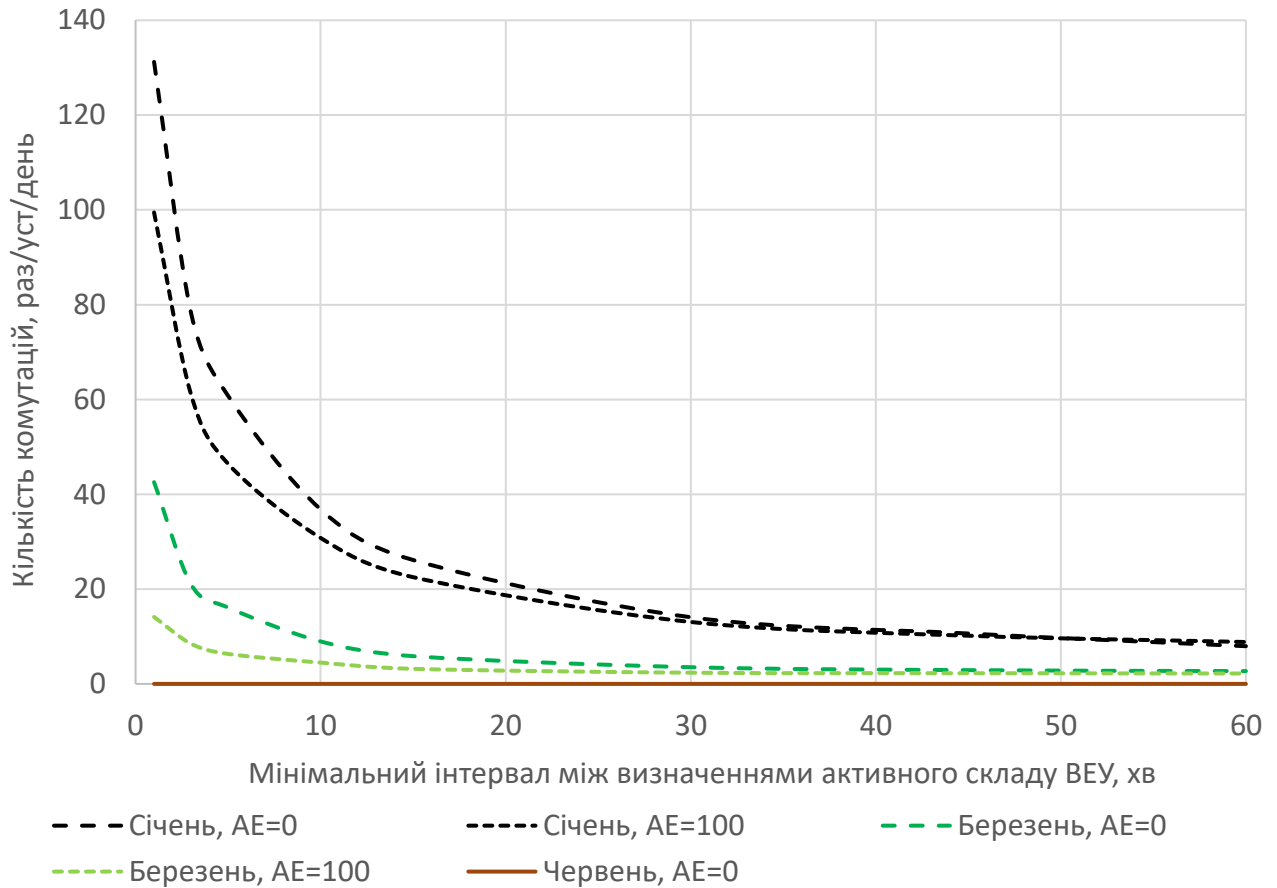


Рис. 4.14 Залежність між мінімальним інтервалом між визначеннями активного складу ВЕС і кількістю перемикачів на одну установку в день

На рисунку 4.14 представлені результати моделювання для червня, але оскільки, протягом періоду моделювання не було моменту коли сумарна потужність всіх ВЕУ більша ніж навантаження споживача, перемикачів ВЕУ не виконувалося. Аналізуючи отриманий графік можна помітити, що використання АЕ дозволяє зменшити кількість перемикачів ВЕУ. При затримці в 1 хв використання АЕ ємністю в 100 МВт*год призводить до зменшення кількості перемикачів ВЕУ на 24% для січні і на 67% для червня. Але вже при затримці в 15 хв використання АЕ дозволяє зменшити кількість перемикачів на 13% для січні і на 46% для березня. Подальше збільшення затримки призводить до зменшення впливу АЕ на кількість перемикачів ВЕУ.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблено інформаційну технологію управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії, яка завдяки використанню розроблених методів, моделей (модель процесів зарядно-розряду акумуляуючого елемента, модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією, метод визначення активного складу за допомогою ансамблю генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж) забезпечує високий рівень ефективності управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання. Для взаємодії між елементами системи використаний стандарт OPC UA, що дозволяє інтегрувати розроблену систему з сучасними SCADA-системами.

Досліджено параметри роботи п'яти конфігурацій гібридної вітро-сонячної системи електропостачання. Встановлено залежність між енергетичною ємністю АЕ і ймовірністю втрати живлення (DPSP), а також, залежність між енергетичною ємністю АЕ і відносною надлишковістю згенерованої електроенергії (REPG) для різних місяців.

Введене поняття мінімального інтервалу між визначеннями активного складу. Проведено дослідження щодо впливу цього параметра на середнє відхилення потужності і кількість перемикачів (включень/виключень) ВЕУ. Встановлено, що при затримці в 1 хв використання АЕ ємністю в 100 МВт*год призводить до зменшення кількості перемикачів ВЕУ на 24% для січні і на 67% для червня. Але вже при затримці в 15 хв використання АЕ дозволяє зменшити кількість перемикачів на 13% для січні і на 46% для березня. Подальше збільшення затримки призводить до зменшення впливу АЕ на кількість перемикачів ВЕУ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності управління енергодинамічними режимами шляхом розроблення інформаційної технології для системи підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання за наявності акумулюючого елемента.

При цьому отримані такі основні наукові результати:

1. Проведено аналіз інформаційних технологій управління енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання, що дозволило сформовано вимоги та визначено напрями їх розвитку.
2. Розроблено модель процесів перетворення енергії сонячною електростанцією, яка завдяки врахуванню визначеного коефіцієнта прозорості та просторових параметрів перетворювача, яка забезпечує прогнозування обсягів генерування енергії та формування балансу потужностей.
3. Удосконалено модель процесів заряду-розряду акумулюючого елемента з врахуванням режиму роботи, що дозволяє визначити моменти зміни енергодинамічних режимів джерел генерації відповідно до розроблених продукційних правил.
4. Розроблено метод визначення активного складу вітрової електричної станції, який за рахунок використання ансамблю генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж забезпечує підвищення швидкодії вибору та адаптацію активного складу до умов зовнішнього середовища.
5. Удосконалено метод визначення активного складу вітрової електричної станції шляхом застосування розробленої моделі процесів заряду-розряду акумулюючого елемента, що дозволяє уточнити результати визначення небалансу потужностей.
6. Реалізовано засобів інформаційної технології управління енергодинамічними режимами за наявністю поновлювальних джерел

енергії, що можуть бути використані для управління енергодинамічними режимами гібридних систем електропостачання.

7. Розроблено інформаційну технологію управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії, яка завдяки використанню розроблених методів, моделей забезпечує високий рівень ефективності управління гібридною вітро-сонячною системою електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] N. Shakhovska, M. Medykovskyy, R. Melnyk та N. Kryvinska, «Optimization of the Active Composition of the Wind Farm Using Genetic Algorithms,» *Tech Science Press (TSP)*, т. 69, № 3, pp. 3065-3078, 2021.
- [2] M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS),» *Journal of Computational Problems of Electrical Engineering*, т. 11, № 1, 2021.
- [3] М. Медиковський та Р. Мельник, «Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента,» в *Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference*, Boston, USA, 2021.
- [4] М. Медиковський, Р. Мельник та М. Дубчак, «Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції,» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі»*, т. 8, р. 55 – 64, 2020.
- [5] M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems,» *Econtechmod. An international quarterly journal*, т. 7, № 3, pp. 33 - 38, 2018.
- [6] V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk та M. Dilai, «Optimization of wind farm structure control,» *Advances in Intelligent Systems and Computing CSIT*, т. 689, pp. 320-333, 2017.
- [7] V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modification of Dynamic Programming Method in Determining Active Composition of Wind Power Stations,» *Computational problems of electrical engineering*, № Vol. 6, pp. 83-90, 2016.
- [8] М. Медиковський, В. Кравчишин, Р. Мельник та О. Шуневич,

- «Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів,» *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 26, № 7, р. 291 – 298, 2016.
- [9] M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Research of the energy-dynamic modes in power supply systems with the battery energy storage system,» в *VIII International Scientific and Practical Conference "current trends of modern scientific research"*, Munich, Germany, 2021.
- [10] M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Method of optimizing the parameters of the photovoltaic solar power plant,» в *Computer Science and Information Technologies XIV International Scientific and Technical Conference*, Львів, 2019.
- [11] Р. Мельник, «Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій,» в *10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні»*, м. Львів, Україна, 2019.
- [12] Г. Шмідт, А. Конеченков, М. Ільчук та М. Гріцишина, «Вітроенергетичний сектор України 2018. Огляд ринку,» Українська вітроенергетична асоціація, 2019.
- [13] A. Konechenkov, «Renewable Energy. Focusing: Ukraine Vision 2050,» [Онлайнвий]. Available: https://www.inforse.org/europe/pdfs/S3_UKR_Vision%202050_FAE.pdf.
- [14] С. Кудря, Л. Яценко та Г. Душина, Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України, Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2008.
- [15] О. Кармазін, Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Автореферат, Київ: Національної академії наук України, 2019.
- [16] M. Huber, D. Dimkova та T. Hamacher, «Integration of wind and solar power

- in Europe: Assessment of flexibility requirements,» *Energy*, № 69, pp. 236-246, 2014.
- [17] В. Павловський, Л. Лук'яненко, І. Гончаренко та А. Захаров, «Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі,» *Праці ІЕД НАНУ*, № 43, pp. 18-23, 2016.
- [18] В. Сидорчук, «Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды. Обзор документов Международного энергетического агентства,» [Онлайновий]. Available: <https://renew.ru/integration-of-renewable-energy-into-the-energy-system-practice-myths-and-legends/>. [Дата звернення: 09 06 2021].
- [19] П. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, *Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія*, Вінниця: ВНТУ, 2018.
- [20] Е. Соловьёва та А. Кондратенков, «Система автономного энергоснабжения здания в условиях II климатической зоны,» *Вестник МГСУ*, № 10, p. 208–215, 2013.
- [21] О. Попель, «Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии,» *Энергосбережение*, № 3, p. 60–65, 2006.
- [22] І. Щур та В. Клишко, «Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта. Електромеханічні і енергозберігаючі системи,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2, pp. 92-100, 2014.
- [23] М. Кузнєцов, О. Лисенко та О. Мельник, «Особенности стохастической оптимизации гибридных энергосистем на базе ВДЕ,» *Відновлювана енергетика*, № 2, pp. 6-15, 2018.
- [24] М. Кузнєцов та О. Лисенко, «Оцінка балансу потужності комбінованих енергосистем,» *Відновлювана енергетика*, № 4, pp. 6-14, 2018.
- [25] М. Стаднік, Д. Проценко та С. Бабій, «Гібридне електропостачання з

- використанням відновлюваних джерел енергії,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, pp. 32-41, 2020.
- [26] «Mechanisms, Interim Report of the Sector Inquiry on Capacity,» European commission, 2016.
- [27] «Large scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations,» [Онлайновий]. Available: <http://www.ewea.org/>.
- [28] «Закон України "Про ринок електричної енергії",» 2017. [Онлайновий]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>. [Дата звернення: 05.06.2021].
- [29] О. Болдирев, А. Квицинський, М. Редін, М. Клопот та М. Головатюк, «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України,» 2019. [Онлайновий]. Available: https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/06/SOU-NEK-341.001_2019.pdf. [Дата звернення: 06.06.2021].
- [30] М. Кулик та О. Згуровець, «Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями,» *Відновлювана енергетика*, № 3, p. 6–14, 2018.
- [31] Д. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, «Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності,» *Наукові праці ВНТУ*, № 2, p. Наукові праці ВНТУ, 2016.
- [32] С. Holger, M. Schimpe, D. Kucevic та A. Jossen, «Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids,» *Energies*, № 10, p. 1 – 42, 2017.
- [33] J. Korpikiewicz, «The Optimal Choice of Electrochemical Energy Storage Parameters,» *Acta Energetica*, т. 1, № 26, p. 56–62, 2016.

- [34] R. Buch, J. Carton, Y. Harasis, L. Sudipta, M. Zedler та J. Lin, Energy Storage Monitor Latest trends in energy storage, World energy council, 2019.
- [35] «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.,» 2021.06.05. [Онлайновий]. Available: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?%20currDir=50358>.
- [36] BloombergNEF, «Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh,» [Онлайновий]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>. [Дата звернення: 2021.04.20].
- [37] А. Барило, М. Бенменні, В. Бурдюк, М. Бурдюк та П. Васько, Відроджувальні джерела енергії. Монографія, Київ, 2020.
- [38] В. Синеглазов, «Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем,» 2020. [Онлайновий]. Available: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Перспективи-розвитку-гібридних-енергети>.
- [39] Н. Мхитарян, Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников, Київ: Наукова думка, 1999.
- [40] С. Обухов та И. Плотников, «Сравнительный анализ схем автономных электростанций,» *Промышленная Энергетика*, № 7, pp. 46-51, 2012.
- [41] A. Ruiz та M. Molinas, «Electrical Conversion System for Offshore Wind Turbines Based on High Frequency AC Link,» в *Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference EVER*, Monaco, 2009.
- [42] E. Gonzalez, B. Stephen, D. Infield та J. Melero, «Using high-frequency SCADA data for wind turbine performance monitoring: A sensitivity study,» *Renewable Energy*, № 131, pp. 841-853, 2019.
- [43] Z. Lin, X. Liu та M. Collu, «Wind Power Prediction based on High-frequency SCADA data along with,» *Journal of Electrical Power and Energy Systems*, № 118, p. 105835, 2020.

- [44] B. Conway, «Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and energy-storage,» *J. Electrochem. Soc.*, т. 138, № 6, pp. 1539-1548, 1991.
- [45] G. Rancilio, A. Lucas, E. Kotsakis, G. Fulli, M. Merlo, M. Delfanti та M. Masera, «Modeling a Large-Scale Battery Energy Storage System for Power Grid Application Analysis,» *MDPI Energies*, т. 12, № 3312, 2019.
- [46] В. Кравчишин, Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019.
- [47] X. Li, D. Hui та X. Lai, «Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, т. 4, № 2, pp. 464-473, 2013.
- [48] M. Jabir, H. Illias, S. Raza та H. Mokhlis, «Intermittent Smoothing Approaches for Wind Power Output: A Review,» *Energies*, т. 10, № 10, 2017.
- [49] C.-F. Lu, C.-C. Liu та C.-J. Wu, «Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability,» *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, № 142, pp. 429-435, 1995.
- [50] X. Jiang, G. Nan та H. Liu, «Optimization of Battery Energy Storage System Capacity for Wind Farm with Considering Auxiliary Services Compensation,» *Applied Sciences*, т. 8, № 10, 2018.
- [51] C.-Y. Wang, T. Xu та S. Ge, «A Fast Rechargeable Lithium-Ion Battery at Subfreezing Temperatures,» *Journal of The Electrochemical Society*, т. 163, № 9, pp. A1944-A1950, 2016.
- [52] О. Ємець та Л. Колечкіна, Ємець О.О. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними цільовими функціями: Монографія, Київ: Наук. думка., 2005.
- [53] М. Медиковский та О. Шуневич, «Виконання цілочисельного програмування для визначення складу вітрової електростанції,» *Збірник*

наукових праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, т. 57, pp. 230-233, 2010.

- [54] О. Емец, Евклидовы комбинаторные множества и оптимизация на них. Новое в математическом программировании, Київ: УМК ВО, 1992.
- [55] S. Martello та P. Toth, «Knapsack problems: algorithms and computer implementation,» *John Wiley and Sons Ltd.*, т. 26, № 50, p. 296, 1990.
- [56] Т. Теслюк, І. Цмоць, В. Теслюк та М. Медиковський, «Оптимізація структури вітрової електричної станції з використанням методу гілок і границь.,» *Восточно-Европейський журнал передових технологій*, т. 2, № 8, 2017.
- [57] М. Медиковський, В. Теслюк та О. Шуневич, «Застосування динамічного програмування для задачі рівномірного використання вітрових електроустановок,» *Технічна електродинаміка : зб. наук. праць.*, т. 4, pp. 135-137, 2014.
- [58] Л. Ладієва, Оптимальне керування системами. Навчальний посібник., 2000: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ.
- [59] D. Casperson, «Towards a Better Presentation of Dynamic Programming,» *WCCCE '14: Proceedings of the Western Canadian Conference on Computing Education*, p. 1–5, 2014.
- [60] О. Шуневич, Інформаційна технологія формування динамічного складу вітрової електростанції, Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2013.
- [61] М. О. Medykovskyy, V. M. Teslyuk та О. В. Shunevych, «Optimization of wind power stations structure by the dynamic programming method,» *Актуальні проблеми економіки*, № 2, pp. 508-515, 2014.
- [62] А. Кожухівський та О. Намофілова, «Застосування генетичних алгоритмів у задачі про укладання ранця,» *АСУ и приборы автоматизи,* № 173, pp. 43-47, 2015.

- [63] Д. Батищев, Е. Неймарк та Н. Старостин, *Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации*, Нижний Новгород, 2007.
- [64] E. J. Anderson та M. C. Ferris, «Genetic Algorithms for Combinatorial Optimization: The Assemble Line Balancing Problem,» *INFORMS Journal on Computing*, т. 6, № 2, pp. 161-173, 1994.
- [65] P. Zhang, «Combinatorial optimization problem solution based on improved genetic algorithm,» *AIP Conference Proceedings*, т. 1864, p. 020206, 2017.
- [66] M. Li, S. Fan та A. Luo, «A Partheno-genetic Algorithm for Combinatorial Optimization,» *ICONIP 2004: Neural Information Processing*, pp. 224-229, 2004.
- [67] Y. Bengio, A. Lodi та A. Prouvost, «Machine Learning for Combinatorial Optimization: a Methodological Tour d'Horizon,» 2018.
- [68] A. Smith Kate, «Neural Networks for Combinatorial Optimization: A Review of More Than a Decade of Research,» *Informs Journal on Computing*, т. 11, № 1, pp. 15-34, 1999.
- [69] S. Abe, J. Kawakami та K. Hirasawa, «Solving Inequality Constrained Combinatorial Optimization Problems by the Hopfield,» *Neural Networks*, т. 5, № 4, pp. 663-670, 1992.
- [70] Н. Мхітарян, С. Кудря, Л. Яценко, Л. Шинкаренко та В. Будько, «Перспективи використання водню у відновлюваній енергетиці,» *Відновлювана енергетика*, т. 3, № 14, pp. 5-15, 2008.
- [71] М. Кузнецов та О. Лисенко, «Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії,» *Відновлювана енергетика*, № 1, pp. 25-32, 2017.
- [72] S. Pelland, S. Remund, J. Kleissl, T. Oozeki та K. Brabandere, «Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art,» 2013. [Онлайновий]. Available: <https://iea-pvps.org/wp->

content/uploads/2013/10/Photovoltaic_and_Solar_Forecasting_State_of_the_Art_REPORT_PVPS__T14_01_2013.pdf.

- [73] С. Блюмин, И. Шуйкова, П. Сараев та И. Черпаков, Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения, Липецк: ЛЭГИ, 2002.
- [74] Р. Трухаев, Модели принятия решений в условиях неопределенности, Москва: Наука, 1981.
- [75] Х. Уэно та М. Исидзука, Представление и использование знаний, Москва: Мир, 1989.
- [76] М. Ahmed, «Modeling Lithium-ion Battery Chargers in PLECS,» 2016. [Онлайновый]. Available: https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs_lithium_ion_adv.pdf.
- [77] Т. Сабірзянов, М. Кубкін, В. Солдатенко та В. Мартиненко, «Узагальнена математична модель накопичувача енергії,» *Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету*, р. 145–150, 2012.
- [78] М. Бик, С. Фроленкова, О. Букет та Г. Васильєв, «Технічна електрохімія. Частина 2. Хімічні джерела струму,» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2018.
- [79] L.-x. Li, X.-c. Tang, Y. Qu та H.-t. Liu, «CC-CV charge protocol based on spherical diffusion model,» *Journal of Central South University*, р. 319–322, 2011.
- [80] А. Ворошилов, А. Петров та Е. Чудинов, «Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима зарядки,» *Новости электротехники*, т. 2, № 104, pp. 24-29, 2017.
- [81] В.-К. Kim, S.-M. Park та S.-J. Park, «A Study on Single-Mode Charger Using DC modeling Equivalent Estimation of the Battery,» *International Journal of Engineering & Technology*, pp. 201-205, 2018.
- [82] S. J. Thomson, P. Thomas та A. R., «Elizabeth Rajan Design and Prototype

- Modelling of a CC/CV Electric Vehicle Battery Charging Circuit,» India, Kottayam, 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET).
- [83] X. Li, L. Xu, J. Hua, X. Lin, J. Li та M. Ouyang, «Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system,» *J. Power Sources*, т. 191, № 2, р. 542–549, 2009.
- [84] X. Li, J. Li, L. Xu, M. Ouyang, X. Han, L. Lu та C. Lin, «Online management of lithium-ion battery based on time-triggered controller area network for fuel cell hybrid vehicle applications,» *J. Power Sources*, т. 195, № 10, р. 3338–3343, 2010.
- [85] А. Юрченко, В. Волгин та С. Козлов, «Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов,» *Известия Томского политехнического университета*, т. 314, № 4, р. 142 – 148, 2009.
- [86] Л. Бурков, «Способ размещения панелей солнечных батарей». Росія Патент 2285209, 2006.
- [87] Д. Даффиб та У. Бекман, Тепловые процессы с использованием солнечной энергии, Москва: Мир, 1997.
- [88] А. Дюсьмикеев, Энергообеспечение инженерных систем и мест общего пользования энергоэффективных зданий солнечными фотоэлектрическими панелями, Минск, 2016.
- [89] P. Duffett-Smith, Practical astronomy with your calculator, New York, 2014.
- [90] J. Duffie та W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey, 2013.
- [91] С. Сивков, Методы расчета характеристик солнечной радиации, Гидрометеиздат, 1968.
- [92] В. Шакиров, «Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов

- метеорологических данных,» *Системы Методы Технологии*, т. 4, № 36, р. 115–121, 2017.
- [93] Ю. Попов, В. Тютя та В. Шевченко, «Методи оптимізації. Навчальний електронний посібник для студентів спеціальностей “Прикладна математика”,» Електронне видання. Ел. бібліотека факультету кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, 2003.
- [94] «Photovoltaic Geographical Information System,» [Онлайновий]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [95] І. Волошин, Загальне землезнавство, Ніжин: НДПУ ім. М. Гоголя, 2002.
- [96] «Forecast & historical weather data,» [Онлайновий]. Available: <https://www.visualcrossing.com/>.
- [97] D. Martini, Application of Neural Network for the Knapsack Problem (Magister theses), Padua: Università degli studi di padova, 2012.
- [98] J. Deane та A. Anurag, «Neural metaheuristics for the multidimensional knapsack problem,» в *Technical report*, 2012.
- [99] B. Krause, L. Lu, I. Murray та S. Renals, «On the Efficiency of Recurrent Neural Network Optimization Algorithms,» в *NIPS Optimization for Machine Learning Workshop*, 2015.
- [100] J. Feng та S. Lu, «Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks,» *Journal of Physics Conference Series*, 2019.
- [101] A. Trask, F. Hill, S. E. Reed, J. Rae, C. Dyer та P. Blunsom, «Neural arithmetic logic units,» в *NIPS'18: Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*, United States, NY, 2018.
- [102] L. R. Silveira, R. Tanscheit та M. Vellasco, «Quantum-inspired genetic algorithms applied to ordering combinatorial optimization problems,» *IEEE World Congress on Computational Intelligence June*, pp. 10-15, 2012.

- [103] C. Lee, «Entropy-Boltzmann selection in the genetic algorithms,» *IEEE transactions on cybernetics*, т. 33, № 1, pp. 138-149, 2003.
- [104] T. Blickle та L. Thiele, «A Comparison of Selection Schemes used in Evolutionary Algorithms,» *Evolutionary Computation*, т. 4, № 1, pp. 361-394, 1997.
- [105] T. Pencheva, K. Atanassov та A. Shannon, «Modelling of a Stochastic Universal Sampling Selection Operator in Genetic Algorithms Using Generalized Nets,» *Tenth Int. Workshop on Generalized Nets Sofia*, pp. 1-7, 2009.
- [106] S. Massinanke та Z. ChaoZhu, «Application of Genetic Algorithm on Travelling Salesman Person,» *Advanced Materials Research*, № 1048, pp. 526-530, 2014.
- [107] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, United States, Boston: Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [108] «Weather Underground,» [Онлайновий]. Available: <https://www.wunderground.com/>.
- [109] «Weather Underground Forecast for Khlepcha, Kiev,» [Онлайновий]. Available: <https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IKIEVKHL2>.
- [110] The original MVC reports Trygve Reenskaug.
- [111] M. C. Contreras, Go Design Patterns, Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2017.
- [112] «Introduction to Spring Framework: Modules,» [Онлайновий]. Available: <https://docs.spring.io/spring-framework/docs/3.0.0.RC2/reference/html/ch01s02.html>.
- [113] I. González, A. J. Calderón, J. Figueiredo та J. M. C. Sousa, «A Literature Survey on Open Platform Communications (OPC) Applied to Advanced Industrial Environments,» *MDPI: Electronics*, т. 8, № 510, 2019.

- [114] «OPC Classic Specification,» [Онлайновий]. Available: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-classic>.
- [115] J. Bucanek, *Learn Objective-C for Java Developers*, Berkely, CA, United States: Apress, 2009.
- [116] D. Choi, H. Kim, D. Won та S. Kim, «Advanced key management architecture for secure SCADA communications,» *IEEE Trans. Power Del*, № 24, p. 1154–1163, 2009.
- [117] W. Mahnke та S. Leitner, «OPC Unified Architecture – The future standard for communication and information modeling in automation,» *ABB Review*, № 2, pp. 56-61, 2009.
- [118] IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems, т. IEEE Std 1472000, IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems, 2000.
- [119] К. Бек, Шаблони реалізації корпоративних додатків, Видавничий дім «Вільямс», 2008, p. 176.
- [120] І. Станкевич та В. Тігарєва, Переваги та недоліки застосування уніфікованої мови UML під час моделювання бізнес-процесів складних організацій, т. № 4(36), Наука й економіка, 2014.
- [121] T. Saaty, *Multicriteria Decision Making: The Analytical Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill, 1990.
- [122] «Jenetics,» [Онлайновий]. Available: <https://jenetics.io/>.
- [123] F. Jianli та L. Shengnan, «Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks,» *Journal of Physics Conference Series: Conf. Series 1237*, 2019.
- [124] В. Палехова, *Макроекономіка*, Київ: Вид-во МФ НаУКМА, 2001, p. 188.
- [125] М. Шапочка та О. Маценко, *Теорія статистики. Навчальний посібник*, Суми: ВТД Університетська книга, 2014, p. 312.

- [126] Underground Weather [Онлайновый]. Available: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IGMINAPR3>.
- [127] Р. Дайчман, «Факторы, влияющие на выработку электроэнергии ветроустановкой,» *Приволжский научный вестник*, № № 1 (53), pp. 41-43, 2016.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. N. Shakhovska Optimization of the Active Composition of the Wind Farm Using Genetic Algorithms / N. Shakhovska, M. Medykovskyu, R. Melnyk, N. Kryvinska // Tech Science Press (TSP) 2021. – Volume 69, Number 3.– pp. 3065-3078
2. M. Medykovskyu Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS) / M. Medykovskyu, R. Melnyk // Journal of Computational Problems of Electrical Engineering 2021.– Volume 11, Number 1.
3. Медиковський М. О. Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції / Медиковський М. О., Мельник Р. В., Дубчак М. А. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі» 8 - SISN. 2020; Випуск 8: сс. 55 – 64
4. Melnyk R. Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems / M. Medykovskyu, R. Melnyk // Econtechmod. An international quarterly journal – 2018, vol. 07, no. 3, 33 - 38
5. Kravchyshyn V. Optimization of wind farm structure control / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyu, R. Melnyk, M. Dilai // Advances in Intelligent Systems and Computing II.– Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2017.– Springer.– Vol. 689.– pp. 320-333
6. Kravchyshyn V. Modification of the dynamic programming method for determining active structure of wind power plant / V. Kravchyshyn, M. Medykovskyu, R. Melnyk // Journal of Computational Problems of Electrical Engineering 2016.– Volume 6, Number 2.– pp. 83-90
7. Медиковський М.О. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих

- елементів / Медиковський М.О., Кравчишин В.С., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016.– т. 26, № 7.– с. 291 – 298
8. Melnyk R. Research of the energy-dynamic modes in power supply systems with the battery energy storage system / Medykovskyy M., Melnyk R. // VIII International Scientific and Practical Conference "current trends of modern scientific research", March 14-16, 2021 Munich, Germany, pp. 210-218
 9. Медиковський М. О. Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента / Медиковський М. О., Мельник Р. В. // Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2021, pp. 466-471
 10. Melnyk R. Method of optimizing the parameters of the photovoltaic solar power plant / Medykovskyy M., Melnyk R. // Computer Science and Information Technologies XIV International Scientific and Technical Conference.– м. Львів, Україна.– 17-20 вересня 2019 року: тези конференції. Львів. 2019.– с. 72-75
 11. Мельник Р. В. Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій / Мельник Р. В. // 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні».– м. Львів, Україна.– 4-5 квітня 2019 року

ДОДАТОК Б

Фрагмент программного коду розробленого програмного забезпечення

RangePacking.java

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.farm.impl;

import java.util.BitSet;
...
import ua.lpnu.wei.model.weicontrol.solarpanel.SunPanel;

@Component
public class RangePacking implements Packing {

    private static long sumSunPower = 0;
    private static long sumWindPower = 0;
    private static long sumLoadPower = 0;

    @Value("${range.packing.delta}")
    protected double rangePackingDelta;
    @Autowired
    private PhysicalParameters parameters;
    @Autowired
    private BatteryControl batteryControl;
    @Autowired
    private Knapsack knapsack;
    @Autowired
    private Timer timer;
    @Autowired
    private SunPanel sunPanel;

    private BitSet weiSet = null;

    public PackingResult packingBackpack(SetOfWEI setOfWEI) {
        double sunEnergy = sunPanel.getFullEnergy();
        double del = batteryControl.changeEnergy(setOfWEI.getPowerOfWEI() -
            parameters.getLoad(), false);
        boolean needRepacking = false;
        double loadMin = parameters.getLoad() * (1 - rangePackingDelta);
        double loadMax = parameters.getLoad() * rangePackingDelta;

        sumSunPower += sunEnergy;
        sumWindPower += setOfWEI.getTotalPowerOfWEI();
        sumLoadPower += parameters.getLoad();
        System.out.println("sumSunPower\t" + sumSunPower + ", sumWindPower\t" +
            sumWindPower + ", sumLoadPower\t" + sumLoadPower);

        if ((!setOfWEI.isAllActive() && setOfWEI.getPowerOfWEI() + sunEnergy <
            loadMin) || del > parameters.getLoad() * rangePackingDelta) {
            knapsack.setLoad(parameters.getLoad());
            knapsack.setSetOfWEI(setOfWEI);
            weiSet = knapsack.getOptimalSet();
            setOfWEI.setListOfActiveWEI(weiSet);
            needRepacking = true;
        }

        del = batteryControl.changeEnergy(setOfWEI.getPowerOfWEI() + sunEnergy -
            loadMin, false);
        del = del - loadMax;
    }
}

```

```

    double sunEnergyUse = sunEnergy;
    if (del > parameters.getLoad() * rangePackingDelta) {
        sunEnergyUse = sunEnergy-(del-parameters.getLoad()*rangePackingDelta);
        del = loadMax;
    }

    return new PackingResult(timer.getCurrentTime(), del,
parameters.getWindSpeed(), parameters.getLoad(), sunEnergyUse,
        batteryControl.getCurrentEnergy(), setOfWEI, knapsack.getProfit(),
batteryControl.getBattery().getCurrentVotume(), -1, needRepacking);
    }

    @Override
    public BatteryControl getBatteryControl() {
        return batteryControl;
    }

    @Override
    public Knapsack getKnapsack() {
        return knapsack;
    }

    @Override
    public void setBatteryControl(final BatteryControl batteryControl) {
        this.batteryControl = batteryControl;
    }

    @Override
    public void setKnapsack(final Knapsack knapsack) {
        this.knapsack = knapsack;
    }
}

```

GeneticAlgorithm.java

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack;
import java.time.Duration;
...
import ua.lpnu.wei.model.models.SetOfWEI;
import ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.assessment.KnapsackAssessment;
import ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack.dp.OptimalSetWEI;

@Component("genetic")
public class GeneticAlgorithm implements Knapsack {
    static Log log = LoggerFactory.getLog(GeneticAlgorithm.class);

    @Autowired
    private KnapsackAssessment assessment;

    @Value("${genetic.population.size}")
    private int populationSize;
    @Value("${genetic.limit}")
    private int limit;
    @Value("${genetic.steady.limit}")
    private int limitBySteady;

    private SetOfWEI set;
    private double profit;
    private double weightOfKnapsack;

    private double fitSum;
    private int n;

```

```

private int count;

public GeneticAlgorithm() {
    super();
    this.weightOfKnapsack = 0;
}

// 2.) Definition of the fitness function.
private Double eval(Genotype<BitGene> gt) {
    OptimalSetWEI optimalSet = chromosomeToOptimalSetWEI(gt.chromosome());
    return assessment.getGeneralProfit(optimalSet, weightOfKnapsack);
}

@Override
public BitSet getOptimalSet() {
    // 1.) Define the genotype (factory) suitable for the problem.
    Factory<Genotype<BitGene>> gtf = Genotype.of(BitChromosome.of(set.size(),
        0.5));

    // 3.) Create the execution environment.
    Engine<BitGene, Double> engine = Engine.builder(this::eval, gtf)
        .selector(new LinearRankSelector<BitGene, Double>(0.2))
        .populationSize(populationSize)
        .alterers(
            //new Mutator<>(0.1),
            //new SwapMutator<>(0.01),
            new UniformCrossover<>(0.8, 0.8))
        .build();

    // 4.) Start the execution (evolution) and collect the result.
    EvolutionStatistics<Double, ?> statistics =
    EvolutionStatistics.ofNumber();
    EvolutionStatisticsByGeneration statByGen = new
    EvolutionStatisticsByGeneration();

    Genotype<BitGene> result = engine
        .stream()
        // .limit(Limits.bySteadyFitness(limitBySteady))
        .limit(Limits.byExecutionTime(Duration.ofSeconds(1L)))
        // .limit(Limits.byFitnessThreshold(0.86))
        .limit(limit)
        .peek(statistics)
        .peek(statByGen)
        .collect(EvolutionResult.toBestGenotype());

    fitSum += eval(result); n++;

    OptimalSetWEI optimalSet = chromosomeToOptimalSetWEI(result.chromosome());
    count += statistics.evaluationDuration().count();
    // denegratedProfit = assessment.getGeneralProfit(optimalSet,
weightOfKnapsack);
    profit = optimalSet.getProfit() /
(optimalSet.getOptimalSet().cardinality() + 1);
    return optimalSet.getOptimalSet();
}

private OptimalSetWEI chromosomeToOptimalSetWEI(Chromosome<BitGene>
chromosome) {
    double assessmentOfSet = 0;
    double weight = 0;
    for (int i = 0; i < set.size(); i++) {
        if (chromosome.get(i).bit()) {

```



```

        assessmentOfSet += assessment.getProfit(set.get(i));
        weight += assessment.getWeight(set.get(i));
    }
}
OptimalSetWEI optimalSet = new OptimalSetWEI();
optimalSet.setOptimalSet(toBitSet(chromosome));
optimalSet.setProfit(assessmentOfSet);
optimalSet.setWeight(weight);
return optimalSet;
}

private static BitSet toBitSet(Chromosome<BitGene> chromosome) {
    BitSet set = new BitSet();
    for (int i = 0; i < chromosome.length(); i++) {
        if (chromosome.get(i).bit()) {
            set.set(i, true);
        } else {
            set.set(i, false);
        }
    }
    return set;
}

@Override
public double getProfit() {
    return profit;
}

@Override
public void setLoad(double load) {
    this.weightOfKnapsack = load;
}

@Override
public void setSetOfWEI(SetOfWEI set) {
    this.set = set;
}

@Override
public KnapsackAssessment getKnapsackAssessment() {
    return assessment;
}

@Override
public String getKey() {
    return "genetic";
}
}

```

EvolutionStatisticsByGeneration.java

```

package ua.lpnu.wei.model.weicontrol.knapsack;

import java.util.HashMap;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.function.Consumer;
import java.util.stream.Collectors;

import io.jenetics.BitGene;
import io.jenetics.engine.EvolutionResult;
import io.jenetics.engine.EvolutionStatistics;
import io.jenetics.stat.DoubleMomentStatistics;

```

```

public class EvolutionStatisticsByGeneration implements
Consumer<EvolutionResult<BitGene, Double>> {

    private Map<Long, EvolutionStatistics<Double, ?>> statistics =
        new HashMap<>();

    @Override
    public void accept(EvolutionResult<BitGene, Double> t) {
        EvolutionStatistics<Double, ?> stat = EvolutionStatistics.ofNumber();
        stat.accept(t);
        statistics.put(t.generation(), stat);
    }

    public Map<Long, EvolutionStatistics<Double, ?>> getStatistics() {
        return statistics;
    }

    public List<Double> getMeans() {
        return statistics.entrySet().stream().map(x -> ((DoubleMomentStatistics)
x.getValue().fitness()).mean())
            .collect(Collectors.toList());
    }

    public List<Double> getMaxs() {
        return statistics.entrySet().stream().map(x -> ((DoubleMomentStatistics)
x.getValue().fitness()).max())
            .collect(Collectors.toList());
    }

    public List<Double> getMins() {
        return statistics.entrySet().stream().map(x -> ((DoubleMomentStatistics)
x.getValue().fitness()).min())
            .collect(Collectors.toList());
    }

    @Override
    public String toString() {
        return statistics.toString();
    }
}

```

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор технічний

ТОВ «ЕНЕРГЕТИЧНА КОМПАНІЯ
«СОНЯЧНЕ ПОЛЕ»

«Сонячне Поле» Станкевич Р.Ю.

«1106131» 2021 р.

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи

Мельника Романа Володимировича

«Інформаційна технологія управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи «Інформаційна технологія управління енергодинамічними режимами за наявності поновлювальних джерел енергії», представленої на здобуття вченого ступеня, можуть бути використані в проектно-конструкторській та виробничій діяльності ТОВ «ЕНЕРГЕТИЧНА КОМПАНІЯ «СОНЯЧНЕ ПОЛЕ».

Для впровадження на підприємстві передано:

- метод передбачення кількості електроенергії згенерованої сонячними панелями за добу наперед з врахуванням метеопрогнозу і визначеного коефіцієнта прозорості атмосфери;
- динамічні характеристики процесів заряду-розряду акумулюючого елемента (в режимі сталого струму/сталого напруги);
- алгоритм (набір продукційних правил) і програмне забезпечення для реалізації системи підтримки прийняття рішень при управлінні енергодинамічними режимами.

Мельник Р. В. підтверджує, що передача вказаних вище матеріалів не породжує для ТОВ «ЕНЕРГЕТИЧНА КОМПАНІЯ «СОНЯЧНЕ ПОЛЕ» жодних фінансових чи будь-яких інших зобов'язань ні щодо нього особисто, ні щодо третіх осіб.

Практичне застосування розроблених Мельником Р. В. моделей і методів дозволяє підвищити ефективність управління енергодинамічними режимами гібридної вітро-сонячної системи електропостачання за наявності акумулюючого елемента.

Передбачається можливість використання результатів дисертаційної роботи в розроблені нових підходів до аналізу та управління енергодинамічними режимами сонячної електричної станції за наявності акумулюючого елемента.

Інженер -Енергетик
ТОВ «ЕНЕРГЕТИЧНА КОМПАНІЯ
«СОНЯЧНЕ ПОЛЕ»

Дисертант



Санагурський О.П.

Мельник Р. В.