

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**магістр**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Застосування методів штучного інтелекту для прогнозування  
виробництва енергії з альтернативних джерел**

Виконав: студент 6 курсу, групи **ЕТмз-61**

напряму підготовки (спеціальності)

**141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

|                   |          |                         |
|-------------------|----------|-------------------------|
|                   | <hr/>    | <b>Амбрашук І.Ю.</b>    |
|                   | (підпис) | (прізвище та ініціали)  |
| Керівник          | <hr/>    | <b>Закордонець В.С.</b> |
|                   | (підпис) | (прізвище та ініціали)  |
| Нормоконтроль     | <hr/>    | <b>Коваль В.П.</b>      |
|                   | (підпис) | (прізвище та ініціали)  |
| Завідувач кафедри | <hr/>    | <b>Коваль В.П.</b>      |
|                   | (підпис) | (прізвище та ініціали)  |
| Рецензент         | <hr/>    | <b>Федак С.І.</b>       |
|                   | (підпис) | (прізвище та ініціали)  |

Тернопіль  
2025

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*  
(повна назва факультету)

Кафедра *електричної інженерії*  
(повна назва кафедри)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри *Коваль В.П.*

«»  2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня *магістр*  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*  
(шифр і назва)

студенту *Амбрашуку Ігорю Юрійовичу*  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Застосування методів штучного інтелекту для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел*

Керівник роботи *Закордонець Володимир Савич, к.ф.-м.н., доцент*  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від *24 листопада 2025 року № 4/7-1023*

2. Термін подання студентом роботи

3. Вихідні дані до роботи *дані про генерацію енергії альтернативними джерелами за певний період, параметри для навчання моделей: тип джерела енергії, погодні умови, сезонність, час доби. Ознаки для моделювання (погода, час року, географічне розташування). Порівняння прогнозних і фактичних даних для оцінки точності прогнозу.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

*1. Аналітичний розділ.*

*2. Розрахунково - дослідницький розділ.*

*3. Проектно - конструкторський розділ.*

*4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

*Презентація з наведеними результатами роботи, порівняльні таблиці, обов'язкові слайди з наведеними заходами по застосуванню методів штучного інтелекту для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел.*

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                                  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                         |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Охорона праці</i>                    | <i>к.т.н., доц. Гурик О.Я.</i>            |                |                  |
| <i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i> | <i>проректор з АГРБ Теслюк В.М.</i>       |                |                  |
| <i>Нормоконтроль</i>                    | <i>к.т.н., зав. каф ЕІ Коваль В.П.</i>    |                |                  |
|                                         |                                           |                |                  |
|                                         |                                           |                |                  |
|                                         |                                           |                |                  |
|                                         |                                           |                |                  |
|                                         |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання

24 листопада 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи                                                   | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Літературний огляд за напрямком дипломної роботи                                | 24.11.25 – 26.11.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
| 2     | Підготовка основної частини пояснювальної записки дипломної роботи              | 27.11.25 – 08.12.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
| 3     | Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзв. ситуаціях»                | 09.12.25 – 12.12.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
| 4     | Складання переліку використаних літературних джерел                             | 12.12.25 – 16.12.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
| 5     | Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату                                  | 16.12.25 – 18.12.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
| 6     | Отримання відгуку та рецензії на дипломну роботу, підготовка доповіді на захист | 18.12.25 – 20.12.25             |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |
|       |                                                                                 |                                 |          |

Студент

(підпис)

Амбрацук І.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Закордонець В.С.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

У кваліфікаційній роботі встановлено, що для завдань прогнозування виробництва енергії доцільно використовувати методи, засновані на штучному інтелекті та машинному навчанні.

**Метою кваліфікаційної роботи є:** застосування методів штучного інтелекту для прогнозування генерації електроенергії з метою забезпечення балансу в ізолюваній енергосистемі.

**Об'єктом дослідження є:** ізолювана електроенергетична система.

**Предметом дослідження є:** застосування методів штучного інтелекту для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел з використанням алгоритмів машинного навчання для підвищення точності та ефективності прогнозів.

**Перелік ключових слів :**

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ВІДНОВЛЮ-ВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, МЕТЕОРОЛОГІЧНІ ДАНІ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА, ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУ.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                 |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|                                                                                                                 | <b>с.</b>     |
| <b>ВСТУП</b>                                                                                                    | <b>6</b>      |
| <br><b>1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ</b>                                                                                 | <br><b>8</b>  |
| 1.1 Аналіз ринку гібридних енергетичних систем що працюють на основі відновлюваних джерелах енергії             | 8             |
| 1.2 Стан і перспективи використання відновлюваних джерелах енергії                                              | 10            |
| 1.3 Аналіз методів прогнозування електроспоживання та генерації                                                 | 16            |
| 1.4 Математичні методи, що використовуються для середньострокового прогнозування електроспоживання та генерації | 18            |
| 1.4.1 Статистичні методи                                                                                        | 18            |
| 1.4.2 Методи прогнозування, засновані на машинному навчанні                                                     | 20            |
| 1.5 Вплив метеорологічних факторів і зміни клімату на вибір моделі прогнозування                                | 23            |
| 1.6 Порівняння методів прогнозування електроспоживання та генерації                                             | 25            |
| 1.7 Висновки до розділу 1                                                                                       | 27            |
| <br><b>2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ</b>                                                                   | <br><b>28</b> |
| 2.1 Опис об'єкта дослідження                                                                                    | 28            |
| 2.2 Вибір інструментів для програмної реалізації                                                                | 29            |
| 2.3 Реалізація попередньої обробки даних                                                                        | 32            |
| 2.4 Розробка алгоритмів машинного навчання для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел        | 34            |
| 2.4.1 Опис моделей машинного навчання                                                                           | 34            |
| 2.4.2 Опис вибірки даних для прогнозування                                                                      | 38            |
| 2.4.3 Перевірка коректності вибірки даних                                                                       | 39            |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5 Навчання моделей машинного навчання на прогнозування                       | 43        |
| 2.6 Висновки до розділу 2                                                      | 46        |
| <b>3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ</b>                                     | <b>47</b> |
| 3.1 Методи пошуку оптимуму в багатофакторних моделях                           | 47        |
| 3.2 Енергетичний баланс і умови оптимальних режимів енергосистеми              | 49        |
| 3.3 Алгоритм рішення та його програмна реалізація                              | 55        |
| 3.4 Аналіз встановлених режимів автономної електроенергетичної системи України | 60        |
| 3.5 Висновки до розділу 3                                                      | 64        |
| <b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>                     | <b>66</b> |
| 4.1 <i>Умови безпечної експлуатації гідротехнічних споруд на ГЕС</i>           | 66        |
| 4.2 Правила безперебійної роботи гідротурбінного обладнання                    | 68        |
| 4.3 <i>Заходи для забезпечення безперебійної роботи електрообладнання</i>      | 69        |
| 4.4 Шляхи запобігання виникнення пожежі                                        | 71        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>                                                       | <b>72</b> |
| <b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>                                                        | <b>73</b> |

## ВСТУП

У даному дослідженні акцент зроблено на ізольовану енергетичну систему (ІЕС) з переважанням ВДЕ. Незважаючи на те, що на відміну від інших пристроїв ВДЕ гідрогенератори абсолютно керовані в короткостроковому інтервалі, їхня наявна потужність залежить від наявного водного ресурсу. В умовах мінливих і невизначених кліматичних умов, а також неможливості встановлення систем накопичення електроенергії достатньої потужності та ємності, виникає завдання планування режимів генерації ІЕС з урахуванням оптимального розподілу ресурсів.

Прикладом такої системи, є ІЕС яка характеризується переважною часткою гідрогенерації малої потужності дериваційного типу. Також в системі діє ГЕС з водосховищем для добового регулювання. Дана ІЕС зазнає серйозних труднощів, пов'язаних зі стійким дефіцитом генерації електроенергії в зимовий період – з листопада по березень, а також надлишком потужності в літній період – з травня по вересень. У літній період ІЕС на 100% забезпечується енергією від ГЕС, тоді як в зимовий період, із зростанням попиту на електроенергію та зниженням рівня води в річках, потрібне задіяння резервів дизельних електростанцій (ДЕС). Причинами проблем у забезпеченні балансової надійності є неможливість сезонного регулювання, кліматичні умови регіону та погана прогнозованість переважаючого побутового навантаження. Застосування ДЕС для покриття небалансу призводить до збільшення собівартості генерації, погіршення екологічної ситуації даного регіону, а також необхідності підтримки цих джерел в працездатному стані при тому, що більшу частину року їх робота не потрібна. З цієї причини введення нових генеруючих потужностей, що вимагає значних капіталовкладень, також небажане, оскільки коефіцієнт використання встановленої потужності цих електростанцій в літній період буде невеликим.

Проблема може бути вирішена, якщо від прийнятої на даний момент системи короткострокового регулювання протягом доби, що не дозволяє забезпечити стаке електропостачання в зимовий період, перейти до середньострокового регулювання протягом тижня, враховуючи можливості всіх генеруючих установок ІЕС. Збільшення горизонту регулювання необхідне для підтримки достатнього запасу гідроресурсів з метою покриття пікового

електроспоживання, а також оптимізації резервів потужності та електроенергії в ІЕС.

У цій кваліфікаційній роботі розроблено модель середньострокового прогнозування електроспоживання, а також планування графіка генерації електроенергії з урахуванням змінного припливу води і температури навколишнього середовища. Дана модель є основою для оптимального вибору складу генеруючого обладнання за комплексним критерієм: мінімум витрат на генерацію електроенергії при максимумі балансової надійності ІЕС.

**Метою кваліфікаційної роботи є:** застосування методів штучного інтелекту для середньострокового прогнозування генерації електроенергії з метою забезпечення балансу в ізольованій енергосистемі.

**Об'єктом дослідження є:** ізольована електроенергетична система.

**Предметом дослідження є:** застосування методів штучного інтелекту для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел з використанням алгоритмів машинного навчання для підвищення точності та ефективності прогнозів.

**Апробація роботи.** Амбращук І.Ю. Розробка пристрою вирівнювання в розподільних електромережах напругою 0,4 кВ / Б.Я. Оробчук, І.Ю. Амбращук, Ю. Назаров// Збірник тез доповідей. Матеріали МНТК «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» ( м. Тернопіль, 28 - 29 травня 2025р.) М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2025. – С. 49 – 51.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, переліку посилань (35 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 77 сторінок, 6 формул, 6 таблиць і 30 рисунків.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Аналіз ринку гібридних енергетичних систем що працюють на основі відновлюваних джерел енергії

Проектування гібридної енергосистеми, яка використовує відновлювальні джерела енергії, є складним процесом, що включає техніко-економічне обґрунтування, проектування на основі моделей (model-based design), моделювання процесів (симуляції) та інтеграцію кількох гібридних ВДЕ, систем зберігання енергії та контролерів для автоматизації з метою забезпечення надійності постачання електроенергії.

На сьогоднішній день відновлювальні джерела енергії є одним із найшвидше зростаючих секторів енергетики. Їх широке впровадження сприятиме зміцненню енергетичної безпеки країни та зменшенню залежності від глобальних енергетичних ринків.

Зростаючі потреби в енергії по всьому світу супроводжуються збільшенням використання ВДЕ. У 2019 році частка цієї енергії в загальному виробництві електричної енергії збільшилася на 1%, досягнувши 26% [18]. Основними факторами цього зростання є введення нових вітрових та сонячних електростанцій, науковий та технічний прогрес у галузі відновлювальних джерел енергії, а також збільшення інвестицій у розвиток цих технологій. Прогнозована частка ВДЕ у виробництві електроенергії до початку 2025 року представлена на рисунку 1.1.

Розподіл первинних енергоресурсів по світу завжди був нерівномірним: деякі країни мають надлишок ресурсів, тоді як інші змушені їх імпортувати. Це створює певні проблеми з енергетичною безпекою. Відновлювана енергетика може допомогти вирішити цю проблему, забезпечивши енергетичну безпеку і покриваючи дефіцит електроенергії завдяки рівномірному розподілу ВДЕ по всьому світу. Тому більшість країн мають рівні умови для використання цих ресурсів.

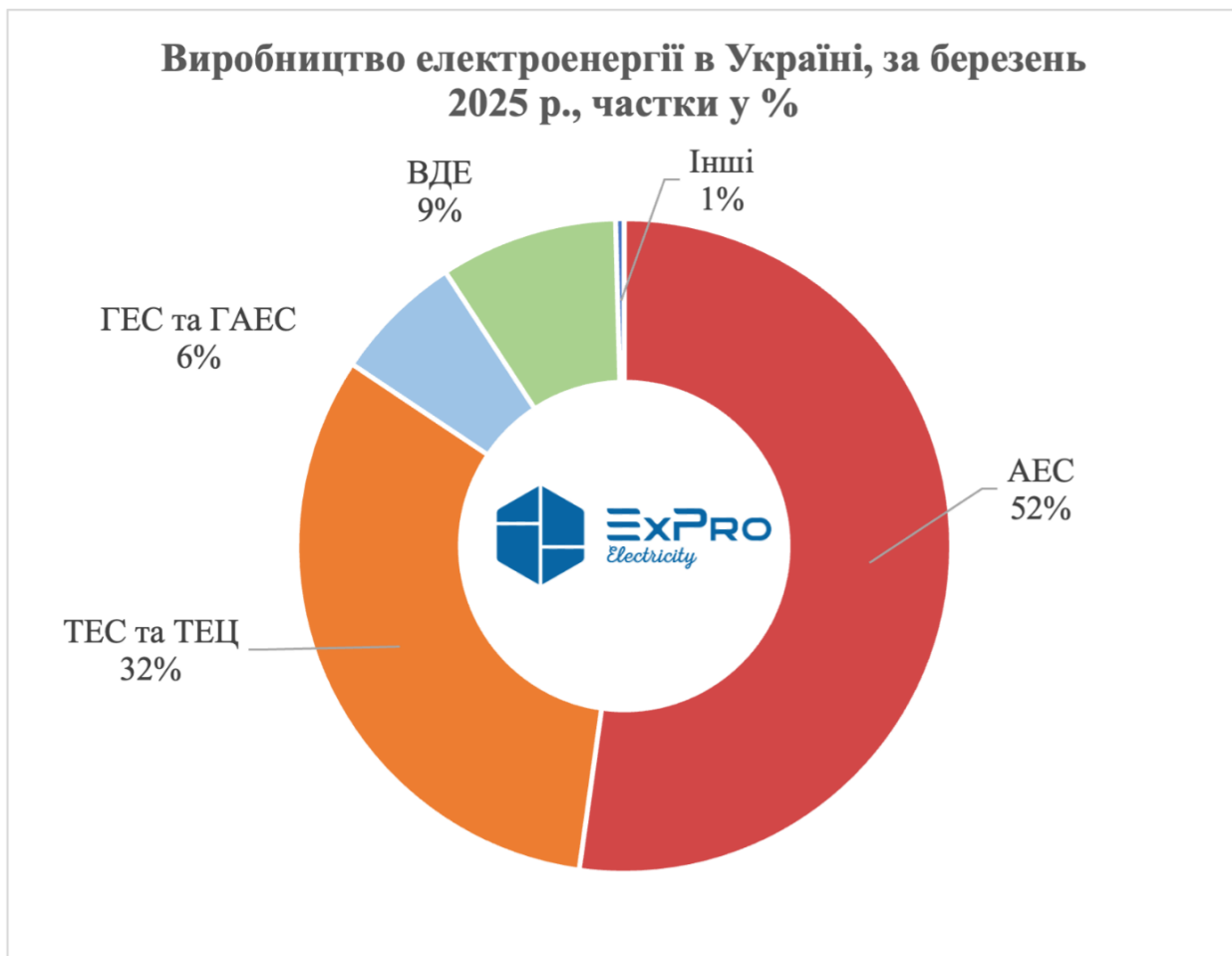


Рисунок 1.1 – Частка ВДЕ у виробництві електроенергії в Україні на початок 2025 року

Необхідно усвідомлювати, що забруднення навколишнього середовища через спалювання вуглецевих видів палива в процесі використання традиційної енергетики становить близько 50% від усіх антропогенних викидів в атмосферу. У той час як альтернативні джерела енергії вирізняються майже абсолютною екологічною чистотою.

Можна констатувати, що структурна трансформація в енергетиці неминуча через стрімкий розвиток нових технологій. Важливим фактором для цього є вичерпання традиційних паливних ресурсів і суттєве зростання цін на енергоносії. Усе це підтверджує необхідність адаптації до нових технологій і розробки сучасних, екологічно чистих та ефективних методів перетворення енергії, серед яких важливе місце займають відновлювальні джерела енергії (ВДЕ).

## 1.2 Стан і перспективи використання відновлюваних джерел енергії

### Енергія вітру

Згідно з попередніми даними, опублікованими Всесвітньою вітроенергетичною асоціацією (WWEA) в 2023 році, загальна потужність всіх вітрових турбін, встановлених до кінця 2022 року, досягла 597 ГВт. В 2022 році було встановлено 50,1 ГВт нової потужності, що трохи менше, ніж у 2021р. – 52,5 ГВт. 2018 рік став другим роком поспіль із зростанням кількості нових установок, хоча темпи зростання уповільнилися до 9,1% порівняно з 10,8% у 2021 році. Всі вітрові турбіни, встановлені до кінця 2018 року, можуть забезпечити майже 6% глобального попиту на електроенергію [12].

Останнім часом Європейські країни, зокрема Німеччина, Іспанія, Франція та Італія, демонструють слабкий розвиток вітрової енергетики. Водночас, стабільне та навіть швидше зростання спостерігається в таких країнах, як Китай, Індія, Бразилія, а також на багатьох інших азіатських та африканських ринках. Лідером на ринку вітроенергетики є Китай, який встановив додаткові потужності вітрових турбін на 21 ГВт, ставши першою країною в світі, де загальна встановлена потужність вітроенергетики перевищила 200 ГВт. Сьогодні Китай продовжує залишатися беззаперечним світовим лідером у цій галузі, маючи встановлену потужність 217 ГВт, і продовжує її активно збільшувати. На другому місці за величиною ринку перебувають США, де нові потужності зросли з 6,7 ГВт у 2017 році до 7,6 ГВт.ГВт у 2022 році, незважаючи на менш амбітні національні, кліматичні та енергетичні цілі. Цей позитивний розвиток є результатом не тільки економіки вітроенергетичної галузі, але також сильної всебічної підтримки державного та муніципального рівнів. Найближчим часом США з потужністю понад 100 ГВт стануть другою після Китаю країною за встановленою потужністю від вітростанцій. З провідних ринків США (додано 7,6 ГВт, досягнувши 96 ГВт), Німеччина (3,1 ГВт, в цілому 59 ГВт),

Індія (2,1 ГВт, 35 ГВт), Великобританія (2,9 Гігават, 20,7 ГВт), Бразилія (1,7 ГВт, 14,5 ГВт) і Франція (1,5 ГВт, 15,3 ГВт) - всі відзначили істотне зростання,

хоча в деяких випадках значно вище, в інших значно нижче, ніж у попередньому році.

Без сумніву, аукціони та тендери є важливим елементом розподілу потужностей. Однак те, як уряди обирають механізми підтримки та розподілу для ВДЕ та енергії вітру, залежить від ринкових умов та структури енергетичного ринку (наприклад, інтеграція, механізм ціноутворення тощо).

У деяких країнах і регіонах світу вітер став одним з найбільших джерел електроенергії. Частка вітрової енергії висока в таких країнах:

- Данія: 21%;
- Португалія: 18%;
- Іспанія: 16%.



Рисунок 1.2 – Вітроенергетичні станції побудовані в Україні



Рисунок 1.3 – Вітроенергетичний потенціал України

### Стан і перспективи використання гідроенергетики.

Протягом останнього десятиліття Європейський Союз подвоїв частку ВДЕ включаючи малі гідроелектростанції (ГЕС), в своєму енергобалансі. Малі, міні- та мікро-ГЕС активно будуються і в країнах, що розвиваються. Наприклад, у Китаї їх встановлена потужність складає 46% від загальної потужності, в Японії – 6%. В Австрії функціонує 1900 малих ГЕС, які разом виробляють близько 4000 КВт · год. на рік.

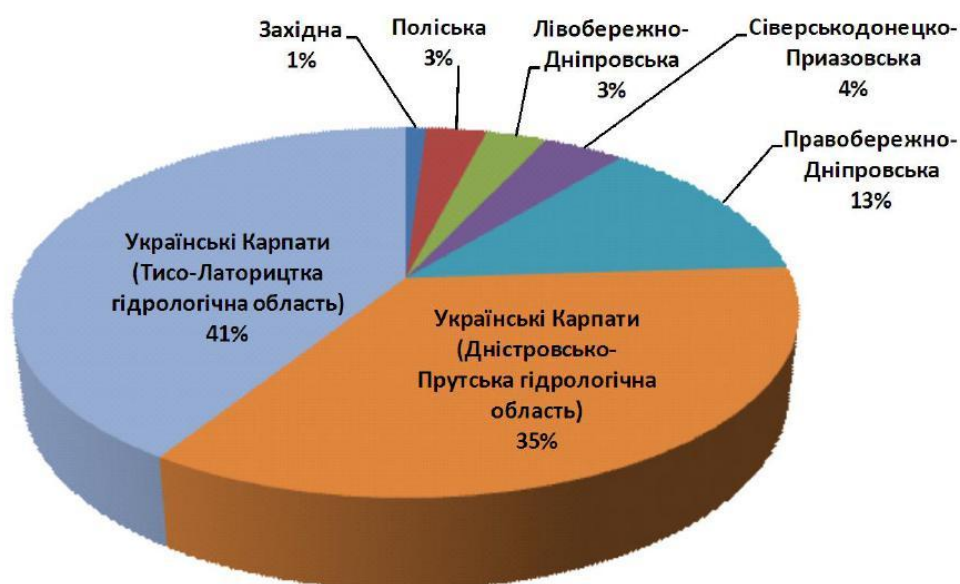


Рисунок 1.4 – Потенціал гідроенергоресурсів в Україні

На рисунку 1.5 наведено запаси гідроенергоресурсів які має Україна.

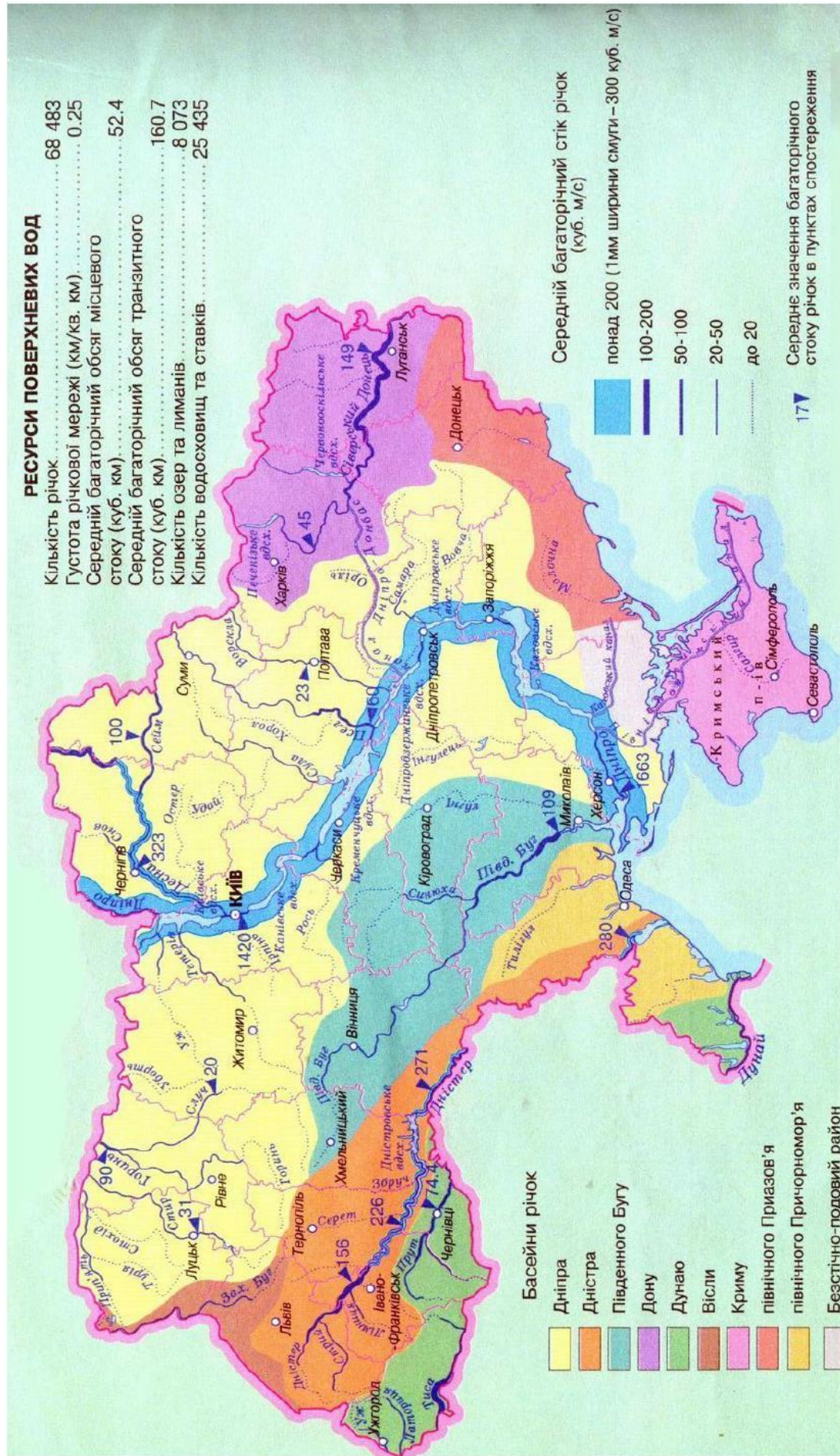


Рисунок 1.5 – Запаси гідроенергоресурсів в Україні

Можна очікувати, що мала гідроенергетика залишатиметься однією з ключових і найбільш конкурентних джерел ВДЕ.

Стан і перспективи використання гідроенергетики в Україні є важливим аспектом енергетичної стратегії країни. Україна має значний потенціал для розвитку гідроенергетики, який досі не використовується на повну потужність. Наявність річок та водних ресурсів, дозволяє розвивати гідроелектростанції (ГЕС) та гідроакumuлюючі станції (ГАЕС), що мають великий потенціал для виробництва відновлювальної енергії.

### **Визначення перспектив і стану використання сонячної енергії**

Потужність сонячного випромінювання може варіюватися від близько 100 Вт в хмарну зимову погоду до понад 1000 Вт в сонячний день біля екватора. Сонячна енергія, що надходить на Землю, як заявляють вчені, перевищує всі потреби людства в енергії приблизно в 10 тис. разів. Якщо хоча б 0,7% земної поверхні покрити сонячними батареями з ККД всього 10%, то енергія, отримана з цієї поверхні, здатна забезпечити потреби всього людства більш ніж на 100% [23].

Глобальний фотоелектричний ринок швидко розвивається та вимагає впровадження більш ефективних і економічних технологій, щоб конкурувати не лише з традиційними джерелами енергії, а й з іншими відновлювальними джерелами. За останнє десятиліття сонячні панелі зазнали значних покращень завдяки інноваційним підходам, що підвищили їх ефективність та вихідну потужність. Ефективність кремнієвих сонячних елементів наближається до максимально можливого значення 29,4%, або так званої межі Оже. Тепер значення ефективності понад 22%, які ще десять років тому були доступні лише для лабораторних сонячних панелей, можуть бути досягнуті за допомогою промислово виготовлених клітинних конструкцій, а прототипи вже демонструють ефективність вище 26%.

На відміну від минулого, коли основна увага зосереджувалась на



міжнародних кредиторів, таких як інститути фінансового розвитку, проектні ризики можуть бути значно знижені. Низької вартості генерації недостатньо для сприяння зростанню; для цього також необхідні правильні політичні рамки і проекти енергетичного ринку.

Враховуючи, що сонячна енергетика відноситься до сектору новітніх технологій, її розвиток сприяє збільшенню наукового потенціалу держави, створенню робочих місць у передовій галузі.

Широке використання сонячної енергії в Україні дозволило б забезпечити чверть державного попиту на електроенергію. За оцінкою наукових досліджень, річний потенціал сонячної енергії оцінюється в 25 млрд. кВт · год. Величезна частка потенціалу не експлуатується.

Значення сумарної сонячної інсоляції при сприятливій погоді досягає 800-900 Вт/м<sup>2</sup> або 8,500 – 9,000 МДж/м<sup>2</sup>. Інтенсивність прямої сонячної радіації змінюється від 1,30 до 1,7 кал/см<sup>2</sup>/хв. Ці значення набагато вищі в гірських районах, де є обмежена можливість використання гідроресурсів.

За результатами наукових досліджень показники інтенсивності прямої сонячної радіації на території України в літній період часу мають значення від 10,3 кВт·год/м<sup>2</sup>, а в зимовий до 5,9 кВт·год/м<sup>2</sup>.

### **1.3 Аналіз методів прогнозування електроспоживання та генерації**

Прогнозування електроспоживання та генерації є основою для прийняття управлінських рішень в електроенергетичних системах. Точність прогнозів безпосередньо впливає на ефективність планування та управління [6]. Прогнозування електроспоживання та генерації є важливою умовою забезпечення безперебійної та ефективної роботи енергосистем, а також важливою основою для створення нових цифрових та інтелектуальних енергосистем. На електроспоживання енергосистеми впливають різні фактори (наприклад, зміна клімату та навколишнє середовище, метеорологічні фактори), електроспоживання енергосистеми має сильну випадковість і мінливість, будучи при цьому частково періодичною величиною. Завдання прогнозування генерації вважається одним з

найскладніших завдань в області інтелектуального аналізу даних, що вимагає комплексного аналізу великих обсягів даних з урахуванням впливу на електроспоживання множинних взаємозв'язків і динамічних процесів.

З точки зору горизонтів прогнозування, прогнози поділяються на чотири різні категорії:

- Оперативне прогнозування: прогноз робиться на кілька хвилин вперед, і прогнозовані значення передаються блоку управління для відправки в режимі реального часу. Це прогнозування використовується для швидкого реагування на внутрішньоденні коливання попиту на електроенергію.
- Короткострокове прогнозування: прогноз робиться від декількох годин до декількох днів наперед, і результати використовуються для широкого спектру рішень, пов'язаних з техніко-економічною оптимізацією функціонування електроенергетичних систем і зобов'язаннями щодо якісного та надійного постачання споживачів електричною енергією. В даний час значимість оперативного і короткострокового прогнозування зростає з причин, пов'язаних із ускладненням систем транспорту і розподілу електроенергії, зростаючими вимогами до якості та надійності електропостачання, а також появою нового обладнання з автоматизованими системами управління.
- У середньостроковому прогнозуванні зазвичай прогнозують на тривалий термін. Отримані прогнози дають інформацію про тижневі коливання, і ця інформація в основному використовується для планування технічного обслуговування мережі, встановлення цін на електроенергію та узгодження механізму розподілу енергії тощо.
- Довгострокове прогнозування: прогноз робиться на тривалий термін, і ця інформація зазвичай використовується для оцінки навантажувальної здатності та аналізу необхідності розвитку електромережевої інфраструктури.

Більшість методів прогнозування електроспоживання та генерації присвячені короткостроковому прогнозуванню (від декількох хвилин до 24 годин), а не середньостроковому. Існують дві основні категорії методів прогнозування електроспоживання та генерації: статистичні методи та методи на основі машинного навчання, хоча межа між ними стає все більш і більш розмитою. Далі методи першої групи позначаються A1, A2, A3, A4 (статистичні) і методи другої

групи B1, B2, B3, B4 (засновані на машинному навчанні).

Традиційні статистичні методи включають методи аналізу часових рядів, метод фільтра Калмана, метод експоненціального згладжування тощо. Однак точність традиційних методів прогнозування може бути недостатньо високою в середньостроковій перспективі через нелінійні характеристики електро-споживання для прогнозування процесів з високим ступенем волатильності. Останнє особливо характерно для ІЕС через їх невеликий розмір відносно великих регіональних і об'єднаних енергосистем. Методи прогнозування, засновані на машинному навчанні, включають нечітку логіку, класичні штучні нейронні мережі (ANN) , нейронні мережі з пам'яттю і ансамблеві методи. Їх можна розглядати як нетрадиційну або сучасну методологію в задачах прогнозування електроспоживання та генерації. У порівнянні з традиційними методами точність прогнозування вища, але оптимізація параметрів кожної моделі ускладнена, що впливає на ефективність прогнозування.

## **1.4 Математичні методи, що використовуються для середньострокового прогнозування електроспоживання та генерації**

### ***1.4.1 Статистичні методи***

Статистичні методи будують математичну або статистичну модель електроспоживання (генерації) шляхом вивчення якісних взаємозв'язків між електроспоживанням (генерацією) і факторами, що впливають на навантаження. Таким чином, спосіб не пропонує користувачеві інтуїтивного розуміння. Цей тип моделей включає в себе моделі регресії (лінійної та нелінійної), авторегресійні моделі (ARIMA, ARIMAX, GARCH, ARDLM та ін.), моделі з експоненціальним згладжуванням, моделі максимальної правдоподібності. Передбачувані параметри моделі оцінюються на основі історичних даних, а адекватність моделі перевіряється шляхом аналізу залишків, тобто помилок прогнозу. Суть цього методу полягає у встановленні нелінійних залежностей між вхідними даними, такими як попередні значення електроспоживання (генерації), і відповідними факторами, що впливають на електроспоживання (генерацію)) і вихідними

даними (прогнозованим електроспоживанням (генерацією)) шляхом їх вираження за явною формулою. Методи прогнозування часових рядів постійно розвиваються, все частіше представляючи собою кількісний підхід з минулими даними як основою для прогнозування, приклади наведено нижче.

Прості статистичні моделі (A1). Переваги цих моделей прогнозування полягають у простоті, гнучкості та узгодженості їх аналізу та проектування.

Моделі експоненціального згладжування (A3). Головні переваги полягають у простих обчисленнях і гнучкості опису різних змін. У на основі аналізу результатів подібних моделей зроблено висновок, що унікальну структуру енергії та попиту, що стосується швидкозростаючих районів, було важко проаналізувати та передбачити прямим застосуванням методу Вінтера. Експоненціальне згладжування було доповнено аналізом спектра потужності та адаптивним авторегресійним моделюванням у гібридному підході. У роботі Філда і Хілла було показано, що метод видалення тренда, заснований на оптимальному згладжуванні, вигідно відрізняється від традиційних методів прогнозування навантаження.

Іноді статистична модель поєднується з іншими методами для формування гібридної моделі, яка має більшу точність у порівнянні зі стандартною статистичною моделлю або навіть звичайною ANN. Деякі приклади таких робіт включають гібридизацію моделі ARIMA з вейвлет-розкладом. Аналогічним чином, підхід байєсівського висновку використовується для визначення параметрів розподілу Вейбулла (ймовірнісне прогнозування) для прогнозування швидкості вітру.

Всі наведені статистичні методи в цілому простіші в реалізації, ніж інші підходи, економічні та вимагають меншої обчислювальної потужності. Використовуючи ці методи, дослідники змогли отримати прийнятні результати для коротких часових інтервалів до 48 годин, але прогнозування стає дуже нестабільним для більш тривалих періодів часу. Іншим недоліком цих моделей є те, що для перетворення даних у стандартну форму потрібна попередня обробка даних часових рядів. У таких додатках використовуються препроцесори, такі як незалежний компонентний аналіз (ICA) і вейвлет-перетворення. Іноді модель

часових рядів комбінується з моделлю фізичного висновку, яка розпізнає фізичні закономірності даних про вітер. Гібрид цих статистичних моделей з інтелектуальними методами також популярний для подолання цих проблем.

#### ***1.4.2 Методи прогнозування, засновані на машинному навчанні***

Найбільш ефективним методом для вирішення завдань прогнозування є методи машинного навчання, здатні виявляти більш складні залежності, ніж простіші регресійні або авторегресійні моделі. Удосконалення математичних методів машинного навчання і збільшення обчислювальних потужностей привели до вражаючих результатів складних моделей машинного навчання в багатьох областях. Однак при побудові прогностичних моделей, особливо на базі машин -

ного навчання, як правило, перший пріоритет віддається підвищенню їх точності. Питання робастності та узагальнюючої здатності (або відсутності перенавчання) враховуються, але відсуваються на другий план. Для підтвердження того, що модель не перенавчена і немає підгонки моделі під вибірку, прийнято використовувати розбиття вибірки на навчальну, валідаційну і тестову, і/або застосовувати техніку крос-валідації. Якщо показники точності моделі на навчальній, валідаційній і тестовій вибірках близькі, то робиться висновок про те, що модель не перенавчена і може застосовуватися в майбутньому на нових даних, на яких вона не навчалася. Перевагами є моделей однорідність їх аналізу та простота. Недоліком є неможливість моделювати процеси на багато кроків вперед. довгою пам'яттю.

Валпник був першим, хто представив SVM; це новий потужний метод машинного навчання, заснований на теорії статистичного навчання (SLT), який аналізує дані і розпізнає закономірності, що використовуються для класифікації і регресійного аналізу. Управління узагальненням з методом усунення прокляття розмірності. Доведено, що інформація про температуру та інші параметри клімату не дуже корисна для середньострокового прогнозування. У роботі модифікована функція ризику звичайних машин з опорними векторами шляхом більш суворого

покарання за нечутливі помилки, ніж за віддалені нечутливі помилки, вони назвали цей метод С-висхідною машиною опорних векторів. Вони дійшли висновку за допомогою тесту, що машини з С-висхідними опорними векторами з фактично впорядкованими вибірковими даними послідовно прогнозують краще, ніж стандартні машини з опорними векторами. Недоліками методу є повільне навчання і підвищені вимоги до програмно-апаратних ресурсів.

Ансамблеві методи (Random Forest, AdaBoost), (B2). Основними перевагами моделей на основі регресійних дерев рішень є висока швидкість навчання і статистична обґрунтованість процесу навчання, масштабованість. Все це дозволяє швидко обробляти великі обсяги даних. До недоліків цих моделей можна віднести перенавчання і неможливість інтерпретації моделей при наявності в них великої кількості вузлів, так як стає занадто багато, щоб їх можна було проаналізувати, [9].

Алгоритм k-найближчих сусідів (kNN), (B3). Одним з найбільш поширених алгоритмів машинного навчання є алгоритм k-найближчих сусідів (k-Nearest Neighbor, kNN), популярність якого обумовлена цілим рядом незаперечних переваг, а саме простотою реалізації і прозорою процедурою роботи. Це призводить до високої інтерпретованості результатів kNN, наприклад, як ансамблі дерев рішень, нейронні мережі, метод опорних векторів та інші [10]. Недоліком kNN є необхідність вибору гіперпараметрів, в першу чергу числа сусідів k, а також метрики відстаней (distance function).

Штучні нейронні мережі (ANN), (B4). Останні досягнення в області машинного навчання (ML) і технологій аналізу даних (DA) надали можливість більш ефективно використовувати велику кількість даних. На сьогоднішній день штучні нейронні мережі мають найвищий рівень популярності. Вони дозволяють будувати скільки завгодно складні моделі для виявлення складних залежностей за рахунок масштабування: збільшення числа шарів моделі, застосування різних елементів обробки даних, таких як прості суматори (нейрони), комірки з внутрішньою пам'яттю, згорткові локальні фільтри, комірки множинного виходу; комбінування різних видів комірок і шарів [11].

Головною перевагою є нелінійність можливість встановлювати нелінійну залежність між майбутніми і минулими значеннями. Інші важливі переваги – адаптивність нейронної мережі прискорює обчислення за допомогою застосування багатоядерних графічних процесорів). Водночас є й недоліки: ресурсоемність навчання, необхідність налаштування великої кількості параметрів не самої мережі, а алгоритмів її навчання. Крім того, їх недолік полягає в «перетренування мережі» (overfitting) і тривалий час навчання у випадку складних архітектур і великих обсягів даних іншої сторони, сучасні досягнення нейронних мереж найчастіше пов'язані саме з їх навчанням на величезних наборах даних і збільшенням обчислювальної складності моделей) [12]. Слід зазначити, що наведена вище класифікація представляє лише основні і часто використовувані моделі прогнозування, проте налічується набагато більше, особливо з урахуванням гібридних моделей.

Використання ANN для прогнозування швидкості вітру і сонячної інсоляції існує зазвичай у поєднанні з іншими передовими методами, такими як вейвлет-декомпозиція або база нечітких правил, щоб компенсувати її недоліки і підвищити точність прогнозування [14]. Всі вони підвищують точність прогнозу, але також вимагають значного обчислювального часу [15].

Деякі більш просунуті, але складні методи – дерева регресії та їх ансамблі, такі як метод «Випадкового лісу». У дослідницькій роботі [16] показано, що підхід до регресійного дерева рішень працює краще, ніж класичні інструменти регресійного аналізу і навіть ANN, і зменшує кількість значущих факторів, що впливають на споживання енергії. Іноді поєднання переваг двох або більше технік дає кращий результат, ніж один метод. Такий випадок представлений формуванням гібридної рекурентної нейронної мережі (RNN) з функціями вейвлет-активації, і показано поліпшення точності прогнозу в порівнянні з простою нейронною мережею. Інша запропонована гібридна модель прогнозування використовує генетичний алгоритм для оптимізації вибору моделі штучного інтелекту (ШІ) і, як повідомляється, перевершує кілька просунутих моделей ШІ.

З огляду літератури з інтелектуальних моделей прогнозування можна зробити висновок, що майбутній внесок полягає в розробці та тестуванні нових підходів до

штучного інтелекту. Моделі прогнозування, засновані на ANN, мають певні недоліки, такі як локальна мінімальна точка, проблеми з підгонкою тощо. Вони можуть бути подолані за допомогою передових гібридних інтелектуальних моделей, таких як SVM, екстремальна навчальна машина (ELM) і адаптивна система нейро-нечіткого виведення (ANFIS), які, як повідомляється, демонструють хорошу продуктивність з точки зору точності прогнозу. Однак

обчислювальні вимоги більшості з цих моделей досить виснажливі, особливо якщо задіяно навчання. Це недолік для реальних додатків, таких як конкурентні енергетичні ринки, де процес торгів відбувається дуже швидко з великою кількістю претендентів.

### **1.5 Вплив метеорологічних факторів і зміни клімату на вибір моделі прогнозування**

У завданнях прогнозування генерації від різних відновлюваних джерел енергії найважливішим фактором є зміна клімату, що протікає, як правило, з низькою швидкістю, але яка в останні роки прискорюється. Крім того, зміна клімату зазвичай відбувається поступово, але можуть виникнути непередбачувані короткострокові зміни. В результаті моделі машинного навчання, побудовані з використанням метеорологічних факторів з хорошими результатами під час тестування, можуть значно знизити точність прогнозування через деякий час через зміну зовнішніх умов. Ризик такого сценарію особливо високий за відсутності даних за довгу історію спостережень. Тому необхідно, по-перше, проаналізувати вплив на точність моделі навіть тих факторів, переваги яких здаються очевидними. По-друге, розумно застосовувати моделі, які не схильні до перенавчання і можуть бути перенавчені на відносно невеликому наборі даних при зміні кліматичних умов, адаптованих до змін. В результаті у вибірці, що використовується для навчання, валідації та тестування моделі, що містить спостереження за кілька років, кліматичні умови можуть істотно відрізнятися від умов всього лише через один рік. В результаті, якою б складною не була предиктивна модель і які б хороші результати вона не

показувала на використуванні в дослідженні вибірці даних, якість її роботи через деякий час може виявитися непридатною.

Тому в таких завданнях необхідно використовувати моделі, які можуть бути швидко, автоматично донавчені або навчені з нуля. Ансамблеві моделі часто вимагають великих обчислювальних витрат на процес навчання, а через високий вплив гіперпараметрів на цей процес необхідна участь людини-експерта, яка б керувала процесом навчання, оцінювала б – чи немає ефекту перенавчання тощо. Можна виключити експерта з даного процесу, використовуючи різні методи автоматичного підбору гіперпараметрів, але це в рази збільшить вимоги до обчислювальних ресурсів. Якщо ресурсів недостатньо, то багаторазове навчання моделі з різними значеннями гіперпараметрів буде займати неприпустимо тривалий час.

Таким чином, не завжди складні за використовуваними алгоритмами і за своїм розміром (наприклад, загальна кількість нейронів мережі або глибина і кількість дерев рішень в ансамблі) моделі можуть бути застосовні на практиці в задачах прогнозування для відновлюваної енергетики з наступних причин:

1. Відсутність необхідного обсягу ретроспективних даних для навчання.  
Причини:

- різка зміна кліматичних, геологічних, технологічних факторів призводить до того, що спостереження за минулі роки виявляються нерелевантними, оскільки змінюються самі приховані залежності вихідної прогнозованої величини від спостережуваних величин;

- може бути відсутня оцифрована історія спостережень за всіма необхідними факторами, особливо в країнах, що розвиваються.

2. Високі витрати на розробку, впровадження, експлуатацію та безперервне донавчання моделей. В рамках досліджень вчені з великим досвідом, високою кваліфікацією та доступом до обчислювальних потужностей можуть, вклавши

свій час і навички, розробити модель з високою точністю. Але для її застосування

на практиці потрібно ще й створення автоматизованої інформаційної системи,

закупівля обчислювального обладнання, обслуговування як програмної, так і апаратної частин і наявність висококваліфікованих фахівців, які здатні швидко визначити, що модель потребує модифікації, і виконати необхідне донавчання моделі або її навчання з нуля.

3. У моделі можуть бути використані метеорологічні дані, дані аерозйомки, супутникового моніторингу тощо, які можуть бути у відкритому доступі для вчених, але не для використання підприємством, що виробляє електроенергію. Підприємству потрібно буде платити за використання цих даних.

## 1.6 Порівняння методів прогнозування електроспоживання та генерації

Проведено аналіз сучасних методів і моделей середньострокового (від декількох годин до декількох тижнів наперед) прогнозування електро-споживання та генерації від ВДЕ, а саме статистичних методів і методів на основі машинного навчання.

Для наочності розглянутих методів нижче в таблиці 1.1 наводяться їхні переваги та недоліки.

Таблиця 1.1

Переваги та недоліки методів середньострокового прогнозування електроспоживання та генерації

| Позначення та джерело | Підхід                                      | Переваги та недоліки                                                                                                                                                      |
|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                     | 2                                           | 3                                                                                                                                                                         |
| A1 [18 – 20]          | На основі застосування статистичних методів | (+) Простота, гнучкість і узгодженість аналізу проектування, (-) Складність визначення нелінійних функціональних залежностей                                              |
| A2 [21;22]            |                                             | (+) Простота і прозорість моделювання, (-) Велика кількість параметрів моделі, низький рівень адаптивності, а також лінійність                                            |
| A3 [23-25]            |                                             | (+) Простота обчислення та гнучкість опису різних змін, (-) Параметри згладжування та початкові умови, не підходять для довгострокового прогнозування                     |
| A4 [26;27]            |                                             | (+) Унікальність і простота способу визначення рішення в разі нормального розподілу, (-) Складність у обчисленні оцінок, пов'язаних з вирішенням рівнянь правдоподібності |

Продовження таблиці 1.1.

| 1                  | 2                            | 3                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1 - A4<br>[28-35] |                              | <b>Висновок:</b><br>(+) Прийнятні результати для коротких часових інтервалів до 48 годин, (-) Прогнозування стає дуже нестійким для більш тривалих періодів часу (-) Для перетворення даних у стандартну форму потрібна попередня обробка даних часових рядів. |
| B1 [37-39]         | На основі машинного навчання | (+) Вони дозволяють брати до уваги численні додаткові фактори, що впливають на точність прогнозування, (-) Повільне навчання та підвищені вимоги до програмно-апаратних ресурсів                                                                               |
| B2 [40]            |                              | (+) Висока швидкість навчання і статистична обґрунтованість процесу навчання, масштабованість, (-) Неоднозначність алгоритму побудови дерева, схильність дерев до перенавчання і неможливість інтерпретації моделей                                            |
| B3 [41]            |                              | (+) Простота реалізації та прозорість процедури роботи. (-) Необхідність вибору гіперпараметрів, насамперед числа сусідів k, а також метрики відстаней                                                                                                         |
| B4 [42;50]         |                              | (+) Дозволяє будувати складні моделі для виявлення складних залежностей за рахунок масштабування: збільшення числа шарів моделі, застосування різних елементів обробки даних<br>(-) Локальна мінімальна точка, проблеми з підгонкою                            |

### 1.7 Висновки до розділу 1

1. У розділі було проведено аналіз ринку гібридних енергетичних систем, що працюють на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), та розглянуто їх важливість для енергетичної безпеки та зниження залежності від традиційних енергоресурсів.

2. Відновлювані джерела енергії, зокрема вітрова та сонячна енергетика, продовжують демонструвати значний потенціал для розвитку, зростаючи часткою в загальному виробництві електричної енергії.

3. Прогнозування електроспоживання та генерації є важливим елементом для ефективного управління енергосистемами, оскільки точність прогнозів впливає на надійність енергопостачання.

4. Існуючі методи прогнозування, зокрема статистичні та методи на основі машинного навчання, мають свої переваги та обмеження, що потребує постійного вдосконалення.

5. Зміна клімату та інші зовнішні фактори можуть суттєво вплинути на точність прогнозування, що вимагає застосування адаптивних моделей.

6. Розвиток ВДЕ та вдосконалення методів прогнозування є важливими складовими частинами сучасних енергетичних стратегій, що дозволяють оптимізувати енергетичне забезпечення та знижувати екологічні ризики.

7. Для України, як країни з великим потенціалом використання ВДЕ, важливо інтегрувати ці технології в енергетичну інфраструктуру та впроваджувати ефективні методи прогнозування для забезпечення стабільного енергопостачання.

## 2 ПРОЕКТНО - КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Опис об'єкта дослідження

Досліджується енергетична система в балансі якої присутні ВДЕ, до яких відносяться вітрові, сонячні та гідроелектростанції. Ключовою особливістю балансу електричної енергії є непередбачуваність генерації електричної енергії зазначеними джерелами, рисунок 2.1.

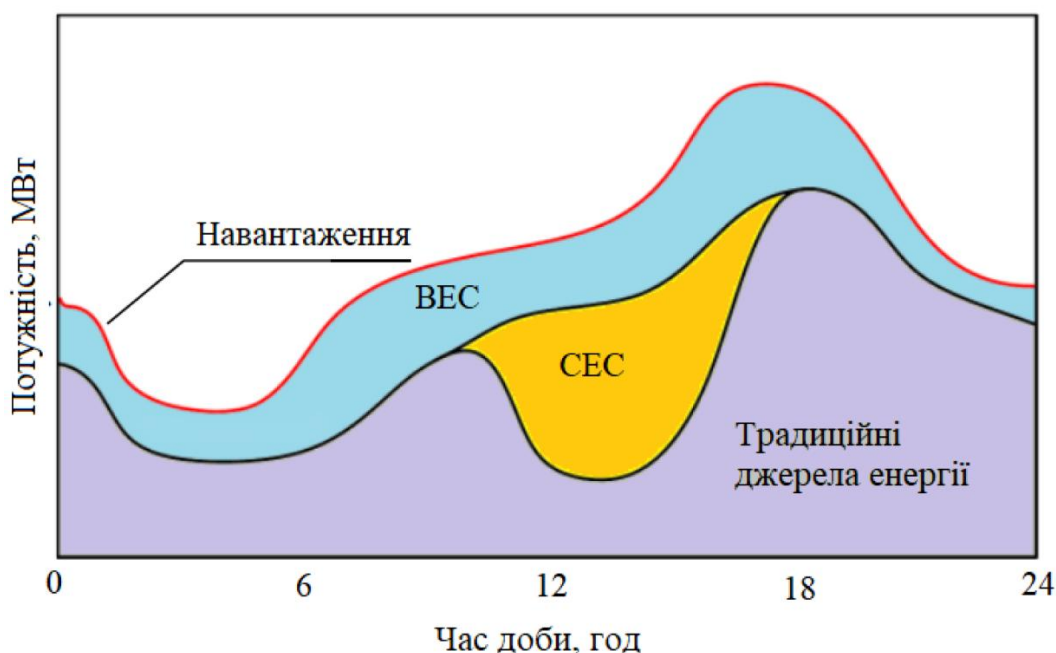


Рисунок 2.1 – Розподіл балансу потужності

У цьому розділі роботи запропоновано метод прогнозування за допомогою рекурентної нейронної мережі з використанням зворотного зв'язку у вигляді коефіцієнта поширення. Прогнозування проводиться для чотирьох сезонів року з використанням погодинних метеорологічних даних за попередні роки. Розглядаються дві математичні моделі прогнозування: одна для багаторічної безперервної вибірки і інша - для окремих годин доби.

Ідея полягає в розробці програмного забезпечення, яке здійснюватиме кілька ключових функцій, зокрема і прогнозування зміни навантаження на енергетичну систему, верифікацію даних на основі результатів прогнозів та відновлення даних за потреби, таблиця 2.1.

Таблиця 2.1

## Аналіз ідеї проекту

| Ідея проекту                                                                                                                                                                                     | Технології та кроки її реалізації                                                | Наявність технологій | Доступність технологій              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Розроблення програмного забезпечення для систем моніторингу та керування розподільними мережами для верифікації, короткострокового прогнозування та відновлення графіків електричних навантажень | Вибір технологій для короткострокового прогнозування, верифікації та відновлення | Наявні               | Доступні                            |
|                                                                                                                                                                                                  | Визначення наявності систем моніторингу та керування                             | Наявні               | Доступні                            |
|                                                                                                                                                                                                  | Перевірка можливості інтегрувати програмне забезпечення в систему                | Немає в наявності    | Планується залучити ІТспеціаліста   |
|                                                                                                                                                                                                  | Розроблення програмного забезпечення та графічного відображення                  | Частково наявна      | Планується залучення ІТспеціалістів |
|                                                                                                                                                                                                  | Інтеграція розробленого ПЗ                                                       | Немає в наявності    | Планується залучення ІТспеціалістів |

Завдяки розвитку інформаційних технологій нині є можливість легкої інтеграції такого програмного забезпечення в системи моніторингу чи управління. Для зручності детальніше опис ідеї наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

## Опис змісту ідеї

| Зміст ідеї                                                                                                                                                                                       | Напрямки застосування              | Вигоди для користувача                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Розроблення програмного забезпечення для систем моніторингу та керування розподільними мережами для верифікації, короткострокового прогнозування та відновлення графіків електричних навантажень | 1) для операторів систем розподілу | Швидке і точне короткострокове прогнозування, достовірні дані                                 |
|                                                                                                                                                                                                  | 2) для промислових споживачів      | Швидке і точне короткострокове прогнозування і достовірні дані, можливість заощадження коштів |
|                                                                                                                                                                                                  | 3) для побутових споживачів        | Швидке і точне короткострокове прогнозування і достовірні дані, можливість заощадження коштів |

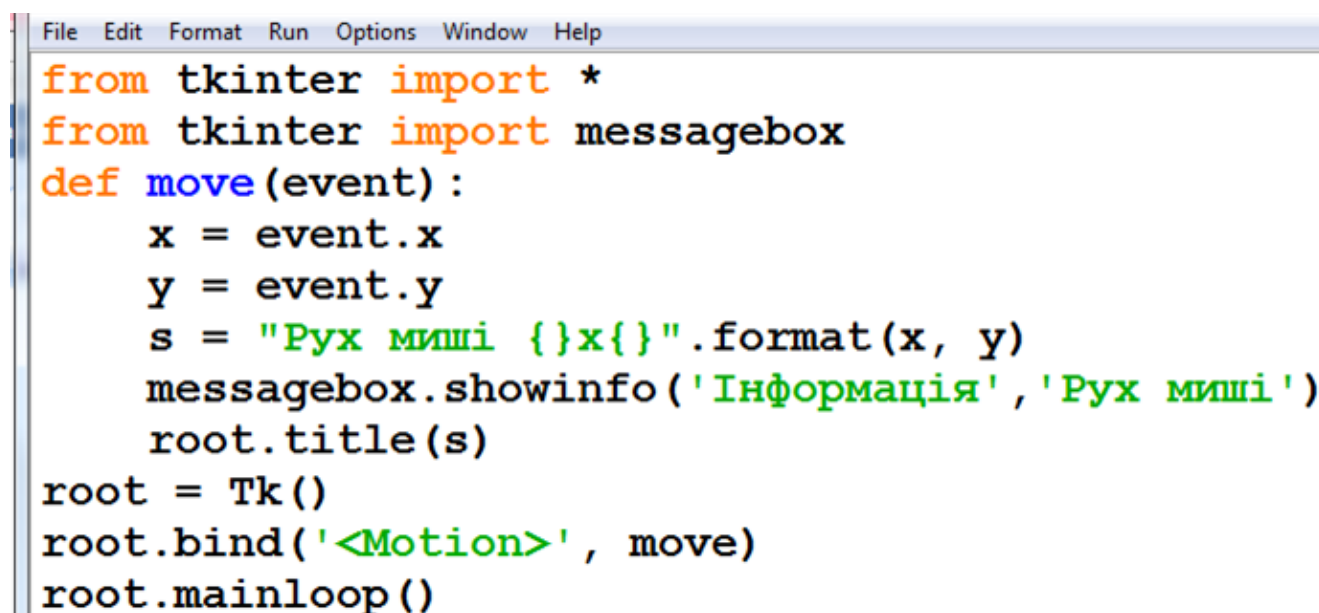
Прогнозовані значення використовуються для оптимізації електроспоживання окремих генеруючих споживачів з метою мінімізації їхніх фінансових та технічних витрат.

## 2.2 Вибір інструментів для програмної реалізації

Для розробки програмного забезпечення було обрано мову Python з низки важливих причин:

- Наявність великої кількості бібліотек, що підтримують обробку даних та машинне навчання.
- Простий і зрозумілий синтаксис мови.
- Легка інтеграція з базами даних.

Python, його інструменти та бібліотеки відносяться до вільного програмного забезпечення, вікно програми показано на рисунку 2.2.



```
File Edit Format Run Options Window Help
from tkinter import *
from tkinter import messagebox
def move(event):
    x = event.x
    y = event.y
    s = "Рух миші {}x{}".format(x, y)
    messagebox.showinfo('Інформація', 'Рух миші')
    root.title(s)
root = Tk()
root.bind('<Motion>', move)
root.mainloop()
```

Рисунок 2.2 – Вікно програми Python

Наступним кроком є вибір платформи для програмування на Python.

Існує безліч середовищ для роботи з цією мовою, але нами буде викорис-тано хмарну платформу Google Colab, вікно платформи наведено на рисунку 2.3.

Це середовище дозволяє створювати та ділитися рішеннями в таких областях, як обробка даних, машинне навчання та програмування на Python.

Основною перевагою Google Colab є те, що для його використання не потрібно нічого встановлювати чи налаштовувати на локальному комп'ютері, що значно спрощує роботу. Крім того, ця платформа дає змогу працювати з проектами в будь-якому місці, де є підключення до Інтернету, без необхідності переносити чи копіювати файли.

Крім того, Google Colab пропонує багато корисних функцій, які роблять його привабливим як для початківців, так і для досвідчених фахівців у галузі математичного моделювання та Data Science.

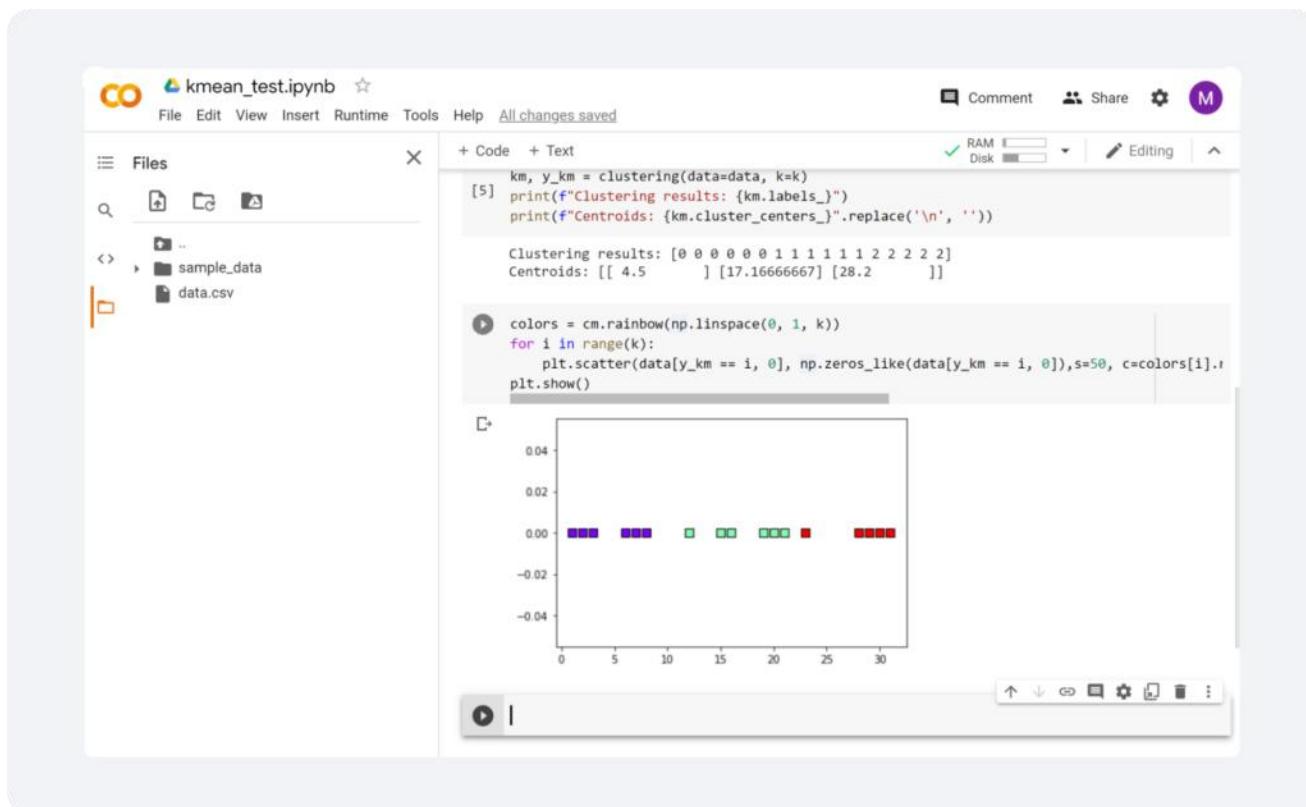


Рисунок 2.3 – Вікно середовища Google Colab

Робота в Google Colab базується на концепції Jupyter Notebook, де програмний код, його пояснення та результати виконання зберігаються в одному файлі, розділеному на комірки.

При роботі з даними для задач машинного навчання часто виникають труднощі, оскільки початкові дані не завжди підготовлені до прямого застосування методів машинного навчання. Ось деякі з основних проблем:

© Числові дані можуть бути представлені у нечисловому форматі. Наприклад, замість чисто числового значення «10» в таблиці може бути записано «10 кВт», або в числовому значенні використовується неправильний роздільник десяткових частин, наприклад, «,» замість «.».

© Різні роздільники стовпців. Наприклад, один стовець може бути відокремлений символом «;», а два інших параметри можуть бути записані в одному стовпці, розділені пробілом або комою.

© Пропущені значення. Замість числа можуть стояти символи «-», «?», пробіл « » або інші непридатні для обробки значення, або ж значення можуть бути порожніми.

Викиди та помилкові значення, які записані в правильному форматі, але сильно відрізняються від інших даних через помилки або некоректні записи, що спотворюють статистику (наприклад, в стовпці потужностей замість кВт потрапили значення в МВт).

Виправлення таких помилок вручну може зайняти значно більше часу, а також існує ймовірність пропустити деякі недоліки. Тому для більш ефективної обробки даних варто автоматизувати очищення. Ось основні етапи цього процесу:

1. Операція зчитування вихідного файлу;
2. Конвертація стовпців у потрібні формати;
3. Визначення та усунення пропусків;
4. Визначення і виправлення викидів;
5. Запис очищеного файлу.

Ці кроки забезпечать якісну підготовку даних для подальшого використання в задачах машинного навчання.

## 2.3 Реалізація попередньої обробки даних

В таблиці 2.3 наведено базу даних, а фрагмент файлу в Excel наведено на рисунку 2.4.

|   | A          | B       | C       | D         | E          | F             | G             | H        | I          | J                   |
|---|------------|---------|---------|-----------|------------|---------------|---------------|----------|------------|---------------------|
| 1 | Data       | Time    | Temp    | Lightness | Day_number | Solar_angle_1 | Solar_angle_2 | Humidity | Visibility | Wind_speed          |
| 2 | 11.02.2017 | 4:30:00 | -21,240 | 0,212     | 42,000     | -             | 0,000         | 71%      | N/A        | 7.2 km/h / 2.0 m/s  |
| 3 | 11.02.2017 | 5:00:00 | -21,170 | 0,271     | 42,000     | -14,587       | 0,000         | 71%      | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 4 | 11.02.2017 | 5:30:00 | -20,980 | 0,306     | 42,000     |               | ?             | 71%      | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 5 | 11.02.2017 | 6:00:00 | -21,030 | 0,270     | 42,000     | -14,587       | 0,000         | 71%      | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 6 | 11.02.2017 | 6:30:00 | -21,240 | 0,239     | 42,000     | -14,587       | 0,000         | 71%      | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |

Рисунок 2.4 – Фрагмент вихідного файлу в Excel

Таблиця 2.3

## Основні елементи бази даних для прогнозування

| Склад інформації                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Дискретність                                                                         | Джерело інформації                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Технологічні фактори</u><br>1. Дані про ОЕС України, регіональні ЕЕС, обленерго<br>а) споживана потужність<br>б) споживана енергія<br>2. Дані по 50 енергоємним підприємствам<br>а) потужність в період вранішнього і вечірнього максимумів навантаження ОЕС України<br>б) споживання енергії<br>3. Дані по структурі електроспоживання по галузям господарства | 1 година<br>1 доба<br>2 значення за добу<br>1 доба<br>1 місяць<br>3 години<br>1 доба | НЕК «Укренерго»<br>Держенергонагляд<br>Держенергонагляд<br>НЕК «Укренерго»<br>Укргідрометеоцентр<br>Укргідрометеоцентр |

З наведеного фрагмента Excel видно наступні проблеми:

✓ є пропуски, причому пропущені значення можуть бути замінені різними символами (прочерк, питання), можуть бути просто відсутні значення або N/A;

✓ є стовпці з крапкою як десятковим роздільником, а є з комою;

✓ є стовпці з числовими даними, але в яких міститься ще й текст;

✓ дата і час розбиті на дві колонки, а між елементами часу і дати використовуються свої роздільники.

Прочитати файл і вивести на екран його початок можна наступним чином (результат наведено на рисунку 2.5):

```
1 input_df = pd.read_excel('/content/solar_raw_data.xlsx')
2 input_df.head()
```

|   | Data       | Time    | Temp   | Lightness | Day_number | Solar_ang_1 | Solar_ang_2 | Humidity | Visibility | Wind_speed          |
|---|------------|---------|--------|-----------|------------|-------------|-------------|----------|------------|---------------------|
| 0 | 2017-02-11 | 4:30:00 | -21.24 | 0.212     | 42         | -           | 0           | 0.71     | NaN        | 7.2 km/h / 2.0 m/s  |
| 1 | 2017-02-11 | 5:00:00 | -21.17 | 0.271     | 42         | -14.587     | 0           | 0.71     | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 2 | 2017-02-11 | 5:30:00 | -20.98 | 0.306     | 42         | NaN         | ?           | 0.71     | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 3 | 2017-02-11 | 6:00:00 | -21.03 | 0.270     | 42         | -14.587     | 0           | 0.71     | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |
| 4 | 2017-02-11 | 6:30:00 | -21.24 | 0.239     | 42         | -14.587     | 0           | 0.71     | 10,0 км    | 10.8 km/h / 3.0 m/s |

Рисунок 2.5 – Результат читання файлу

## 2.4 Розробка алгоритмів машинного навчання для прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел

### 2.4.1 Опис моделей машинного навчання

Існує безліч алгоритмів машинного навчання, що застосовуються для розглянутої задачі вироблення електричної енергії з ВДЕ. Нижче наведено опис найбільш часто використовуваних.

Лінійна регресія – лінійна математична модель залежності виду:

$$y^*(X) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m + b \quad (2.1)$$

де  $y^*$  – прогнозоване значення;

$X$  – вектор з  $m$  вхідних ознак;

$a$  – вектор коефіцієнтів регресії;

$b$  – зміщення.

Якщо лінійна регресія застосовується разом з формуванням поліноміальних ознак, то її називають поліноміальною.

Наприклад, поліноміальна регресія 2-го порядку:

$$y^*(X) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1x_1 + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{mm}x_mx_m + b, \quad (2.2)$$

Алгоритм kNN (k-nearest neighbors) полягає в тому, що з навчальної вибірки вибирається  $k$  об'єктів, найбільш схожих за своїми ознаками  $X$  на об'єкт, для якого потрібно визначити  $y$ , потім відбувається усереднення:

$$y^*(X) = 1/k \sum_{j=1}^k \text{sort}(y(X), X - X_i), \quad (2.3)$$

Метод опорних векторів (support vector machine, SVM) – метод, що модифікує лінійну регресію. Він базується на пошуку гіперплощини, яка мінімізує суму квадратів відхилень між передбачуваними значеннями та фактичними значеннями навчальних прикладів з найбільшим зазором між ними. Це дозволяє досягти високої узагальнюючої здатності моделі. Навчальні приклади, які знаходяться на межі зазору або всередині нього, називаються опорними векторами. Крім того, SVM дозволяє використовувати функції ядра для нелінійного перетворення даних у простір з більш високою розмірністю, що схоже на процес генерації нових ознак, але для SVM цей процес тісно пов'язаний із процесом самого навчання.

Моделі на базі дерев рішень являють собою ієрархічні моделі у вигляді вкладених правил виду «ЯКЩО ... ТОДІ ... ІНАКШЕ». При навчанні дерева рішень як для класифікації, так і для регресії дерева будуються за принципом рекурсивного розбиття навчальної вибірки на дві частини. У задачах класифікації нижні вузли дерева рішень – це класи, а в задачі регресії – це значення шуканої величини. Дерево будується зверху вниз. Для побудови кожного чергового правила робиться статистична оцінка, яке правило найсильніше знизить рівень невизначеності.

Одне дерево можна представити у вигляді:

$$y_m^* = t(X), \quad (2.4)$$

де  $t$  – ієрархічна система правил, кожне з яких порівнює значення певної ознаки з пороговим значенням.

Дерева рішень часто об'єднують в ансамблі для підвищення точності та стійкості до перенавчання окремого регресійного дерева. Два найпоширеніші ансамблеві методи: бегінг (bagging) і бустінг (boosting). Бустінг, як правило, підвищує точність базової моделі, знижує помилку (bias). Бегінг же, як правило, корисний, якщо потрібно підвищити стабільність базової моделі, знизити її чутливість до невеликих змін у даних (те, що в англійській літературі називається variance), іншими словами, знизити схильність моделі до перенавчання (overfitting).

Лінійна регресія – це статистична модель, що використовується для апроксимації залежності між набором ознак (незалежних змінних) і цільовою змінною (залежною змінною). Лінійна регресія являє собою математичну модель, де залежність між ознаками і цільовою змінною описується лінійною функцією.

Для визначення параметрів лінійної регресії використовуються різні методи, такі як метод найменших квадратів, максимальна правдоподібність та інші.

Метод опорних векторів (SVM) є популярним алгоритмом машинного навчання, що істотно модифікує модель логістичної та лінійної регресії. SVM прагне знайти гіперплощину, яка максимально розділяє навчальні приклади різних класів з найбільшим зазором (маргінальним ядром) між ними.

Це дозволяє досягти високої узагальнюючої здатності моделі. Навчальні приклади, які знаходяться на межі маргінального ядра або всередині нього, називаються опорними векторами. Вони відіграють ключову роль у визначенні гіперплощини поділу і визначають межі класів. SVM дозволяє використовувати ядерну функцію для нелінійного перетворення даних в простір з більш високою розмірністю, де лінійний поділ може бути досягнутий. Це дозволяє моделювати складні нелінійні залежності між ознаками. Також SVM включає параметр регуляризації, який дозволяє балансувати між точністю моделі та її узагальнювальною здатністю. При переході до задачі регресії, замість поділу класів в SVM прагне знайти гіперплощину, яка мінімізує суму квадратів відхилень між передбачуваними значеннями.

**Окремий великий клас моделей – нейромережеві.** Вони відрізняються різноманітністю архітектур, серед яких можна виділити ряд найбільш підходящих для завдань регресії.

Однією з найпростіших і базових нейромережевих архітектур для регресії є багат шаровий персептрон. Модель складається з вхідного шару, одного або декількох прихованих шарів і вихідного шару. У кожному шарі, крім вхідного, застосовуються нелінійні активаційні функції, такі як ReLU або гіперболічний тангенс, які дозволяють моделі навчатися складним, немонотонним, залежностям між входами і виходами.

Рекурентні нейронні мережі ефективні для роботи з послідовностями даних такими як часові ряди, де порядок даних є важливим. RNN використовують цик

- лічні зв'язки між нейронами, дозволяючи інформації зберігатися і передаватися від одного кроку до іншого.

Регресійне дерево рішень – модель вигляду ієрархічної системи правил, кожне з яких ділить підвибірку на дві частини, на основі порівняння однієї ознаки з пороговим значенням. Регресійне дерево рішень будується рекурсивно шляхом поділу даних на підмножини на основі значень ознак. На кожному вузлі дерева вибирається найкраща ознака і значення поділу, які мінімізують дисперсію цільової змінної в кожній підмножині. Для вибору найкращого поділу на кожному вузлі дерева використовуються різні критерії, такі як критерій Джині. Метою є мінімізація дисперсії цільової змінної в кожній підмножині.

Існує ряд методів, що підвищують точність і стабільність (стійкість до перенавчання і викидів) дерев рішень. Вони засновані на об'єднанні дерев в ансамбль.

Випадковий ліс будується з дерев, кожне з яких навчається на випадковій підвибірці даних і випадковій підмножині ознак:

$$y_i^* = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j(X_i) \quad (2.5)$$

Адаптивний бустінг послідовно навчає слабкі моделі на зважених вибірках даних, де ваги екземплярів оновлюються на кожній ітерації в залежності від попередніх помилок моделі.

Градiєнтний бустінг послідовно навчає слабкі моделі на зважених вибірках даних, де ваги екземплярів оновлюються на кожній ітерації в залежності від градієнта помилки моделі.

Обидві останні в списку моделі можна описати як:

$$y_i^* = \sum_{j=1}^m w_j t_j(X_i), \quad (2.6)$$

де  $w_j$  – вага  $j$ -ї моделі.

### ***2.4.2 Опис вибірки даних для прогнозування***

Використовувана база даних представлена у вигляді таблиці і містить інформацію про вироблену електричну енергію від ВДЕ по годинних інтервалах часу. Крім фактично виробленої електричної енергії, в таблиці представлена інформація про спостережувані погодні умови.

Повний список параметрів для системи з сонячними панелями:

1. Година доби.
2. Номер дня в році.
3. Кут сонячного схилення (КСС) – це кут між площиною екватора Землі і прямою, що з'єднує центри Сонця і Землі. Цей кут змінюється протягом року через нахил осі обертання Землі відносно її орбіти навколо Сонця.
4. Сонячний час. Це система часу, заснована на положенні Сонця в небі, вона відрізняється від стандартного або координованого всесвітнього часу (UTC), який використовує середній сонячний час у Гринвічі, оскільки цей час визначається моментом, коли верхній край сонячного диска перетинає місцевий меридіан (лінію, що проходить через географічний полюс і дану точку на земній поверхні).
5. Щільність потоку сонячного випромінювання (ЩПСВ) на межі з атмосферою.
6. Хмарність, %.
7. Коефіцієнт прозорості атмосфери (КПА), %.
8. Температура повітря, °C.
9. Вологість повітря, %.
10. Швидкість вітру на висоті 2 м від рівня земної поверхні, м/с.
11. Фактичне виробництво електричної енергії, кВт·год.

### ***2.4.3 Перевірка коректності вибірки даних***

Після попередньої обробки даних необхідно перевірити вибірку ще раз. Перед цим слід виконати підключення бібліотек. У роботі використано велику

кількість модулів з бібліотеки sklearn, крім того, бібліотеки для візуалізації даних.

Підключення всіх бібліотек:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from bokeh.plotting import figure, output_file, show
from bokeh.io import output_notebook
output_notebook()
from sklearn import metrics
from sklearn.model_selection import cross_val_score
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.ensemble import AdaBoostRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
```

Читання вихідного файлу:

```
data = pd.read_excel('/content/solar_data_regression.xlsx')
data.head()
```

Перевірка типів даних показує, що всі стовпці в числовому форматі:

```
data.dtypes
```

Коефіцієнти кореляції Пірсона і Спірмена між усіма парами ознак показані на рисунках 2.6, 2.7. Нижче наведено код для його створення.

```
plt.figure(figsize=(9, 9))
sns.heatmap(data.corr(method='spearman'),
            cmap='RdYlGn',
            vmax=1, vmin=-1, square=True,
            annot=True,
            fmt='.2f',
            cbar=False)
```

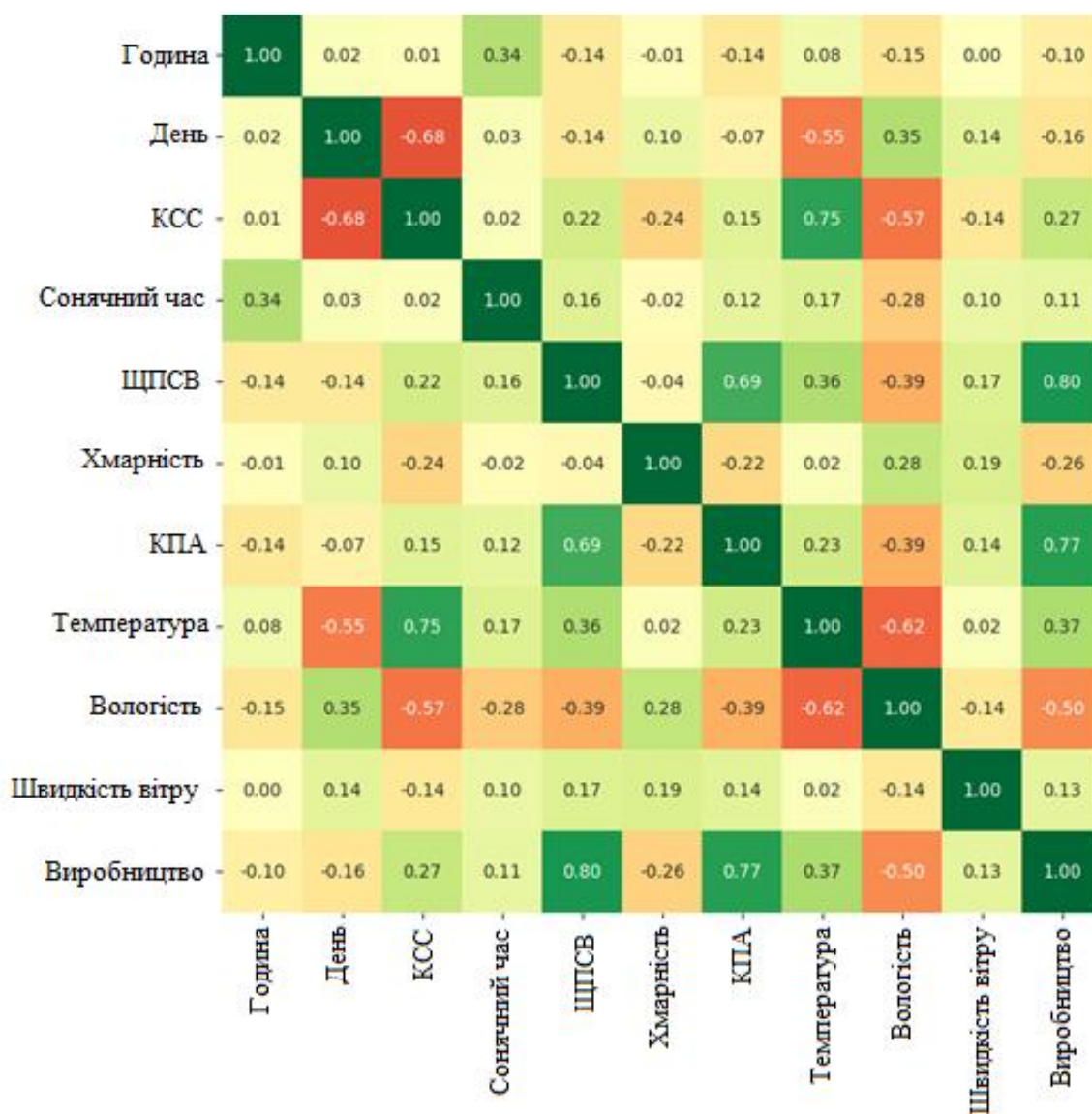


Рисунок 2.6 – Матриця кореляцій за Пірсоном

Нижче наведено код для побудови інтерактивного графіка генерації:

```
p = figure(plot_width = 800, plot_height = 400)
```

```
p.scatter(np.arange(len(data.index)), data['Generation'].values
, line_width = 2, color = 'green', legend_label = 'G')
p.line (np.arange
(len(data.index)), data['Generation'].values
, line_width = 2, color = 'green', legend_label = 'G')
show(p)
```

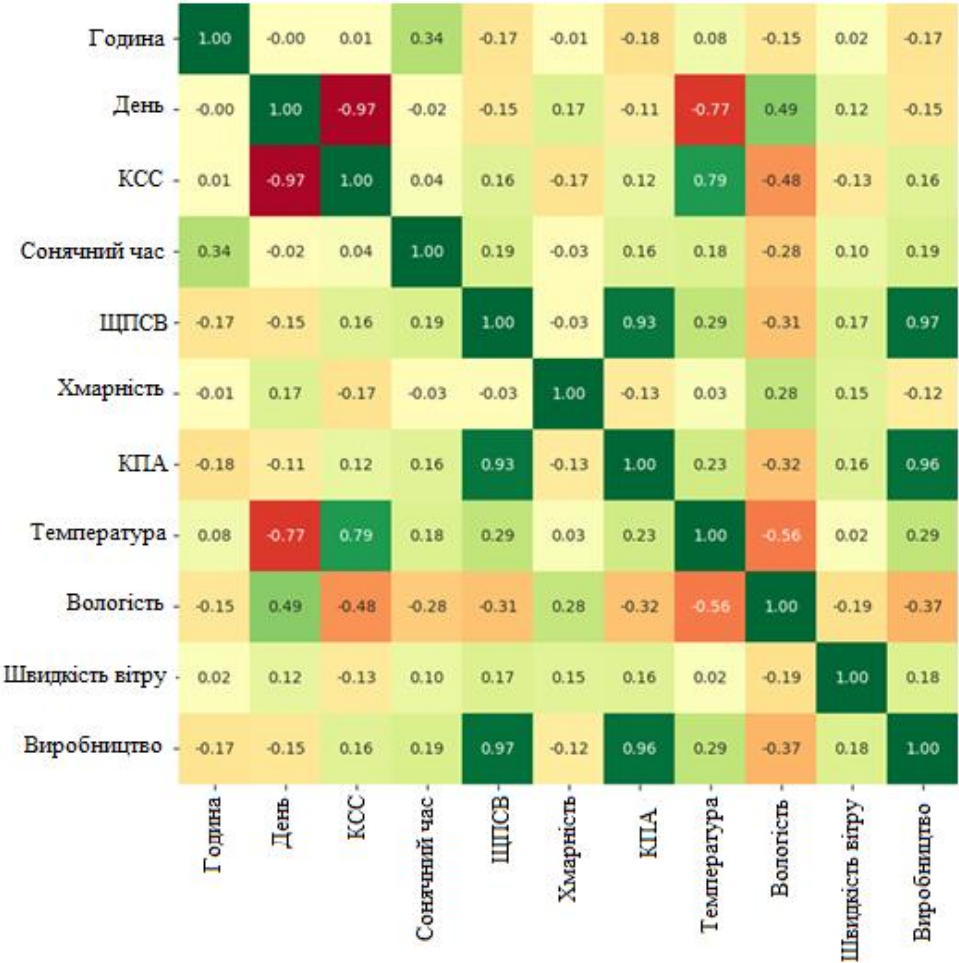


Рисунок 2.7 – Матриця кореляцій за Спірменом

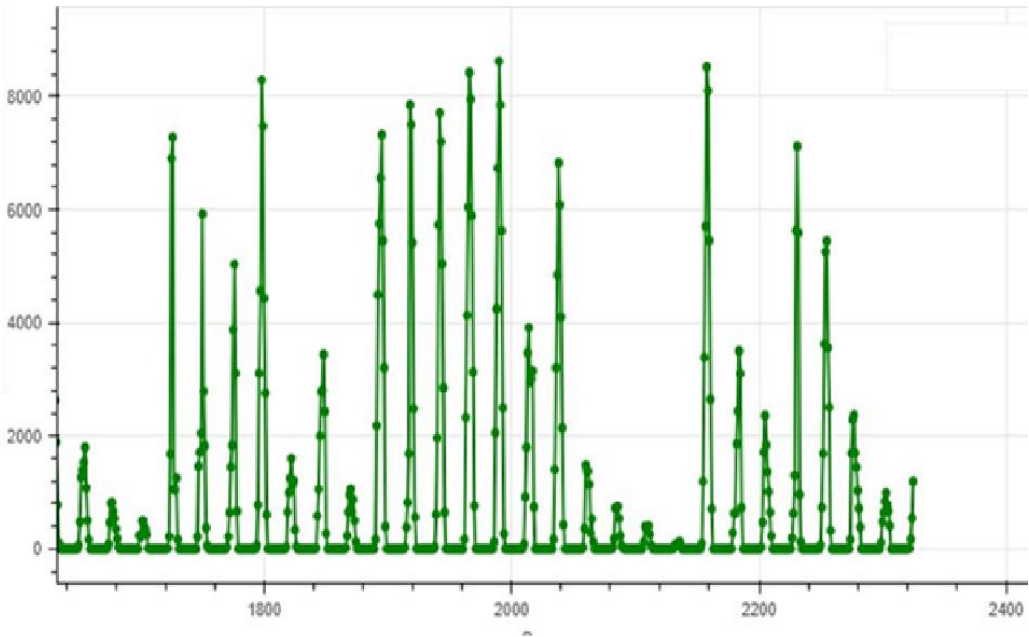


Рисунок 2.8 – Графік генерації

На рисунках 2.9 – 2.14 показано візуалізації, отримані під час аналізу даних.

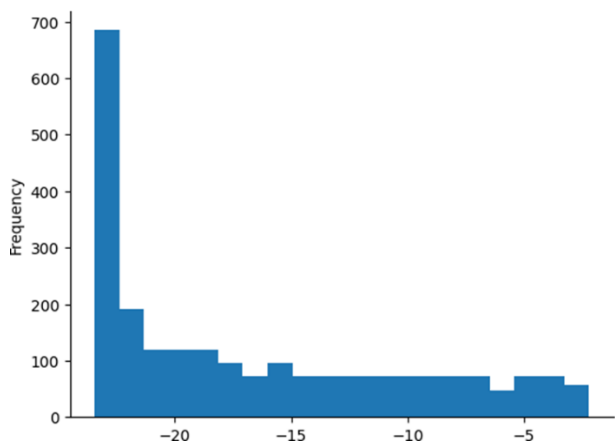


Рисунок 2.9 – Розподіл значень кута сонячного схилення

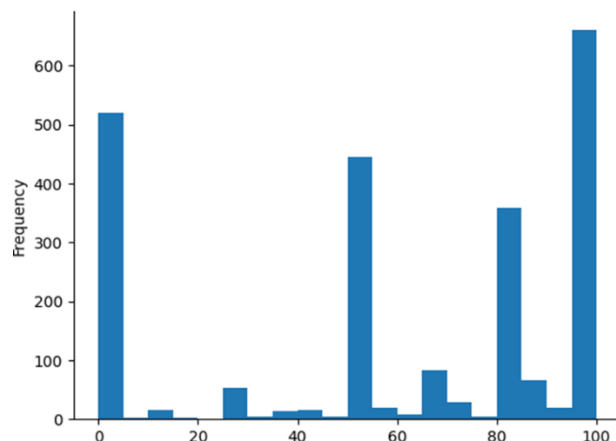


Рисунок 2.10 – Розподіл значень хмарності

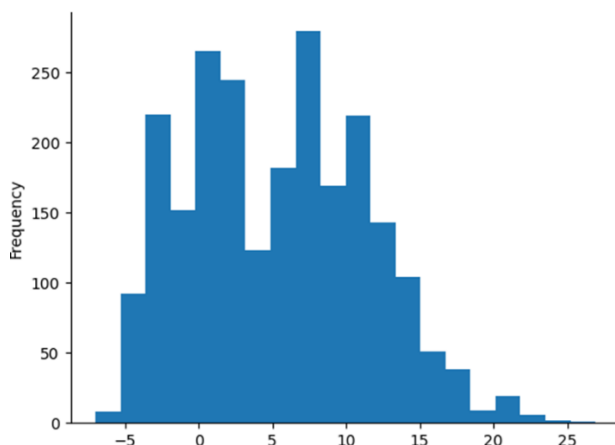


Рисунок 2.11 – Розподіл значень температури

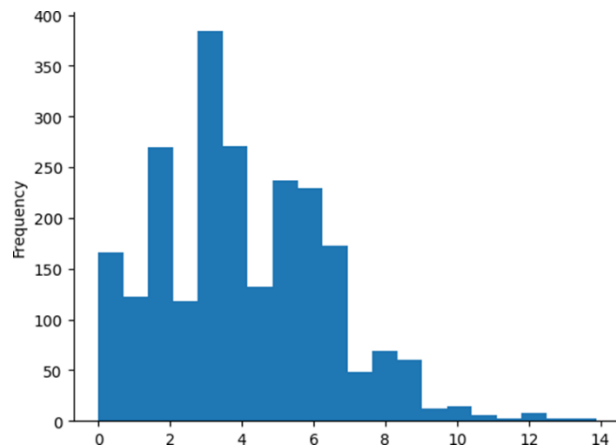


Рисунок 2.12 – Розподіл швидкості вітру

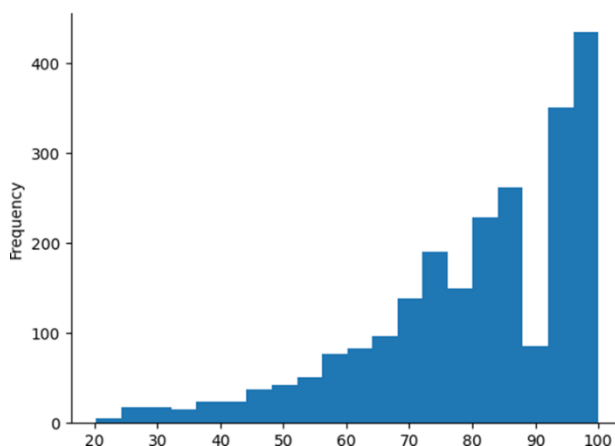


Рисунок 2.13 – Розподіл значень вологості

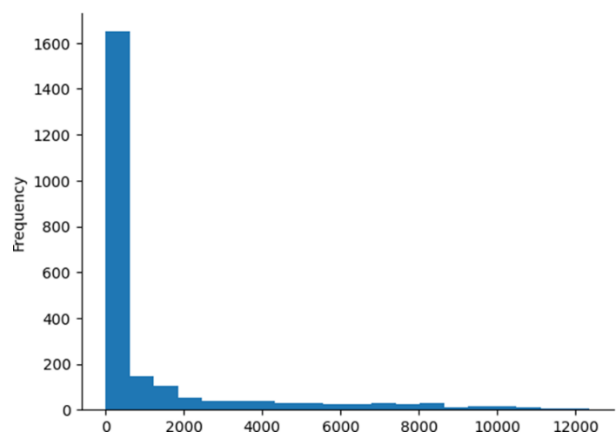


Рисунок 2.14 – Розподіл виробництва

## 2.5 Навчання моделей машинного навчання на прогнозування

### *Розділимо вибірку на дві частини :*

- 1) для навчання та валідації,
- 2) для підсумкового тестування.

Щоб завдання було ближчим до реального, в тестування береться не довільна частина вибірки, а 20-відсоткова частина, яка відноситься до більш нових даних.

```
train_split_point = int(len(data.index) * 0.8)

X_trainval = data.iloc[: train_split_point, :-1]
y_trainval = data.iloc[: train_split_point, -1]

X_test = data.iloc[train_split_point : , :-1]
y_test = data.iloc[train_split_point : , -1]
print(data.shape, X_trainval.shape, X_test.shape)
```

Оскільки далі одні й ті ж дії будуть виконуватися різними моделями, код оформлений у функції.

Перша функція виконує процес крос-валідації для заданої моделі та даних. Використано розбиття на 5 різних наборів ( $cv = 5$ ).

У `sklearn` прийнято, що чим більша метрика, тим краще, тому використовується RMSE, помножене на -1. І при виведенні показника на екран метрика теж множиться на -1, щоб отримати позитивне RMSE. При виведенні помилки округлюються до цілого.

```
def create_evaluate_model(model, X, y): scores = cross_val_score(model, X, y,
cv=5
, scoring='neg_root_mean_squared_error') print('RMSE on validation sets:',
scores * -1, 'kWh') print('Mean RMSE on validation sets:.'
, int(scores.mean() * -1), 'kWh')
model.fit(X, y)
print('Mean RMSE on train set:')
```

```
, int(calc_rmse(model, X, y)), 'kWh')
```

```
return model
```

Функція для розрахунку RMSE моделі:

```
def calc_rmse(model, X, y):
```

```
    return np.sqrt(metrics.mean_squared_error( model.predict(X), y))
```

Функція для візуалізації роботи моделі:

```
def visualize(model, X, y):
```

```
    p = figure(plot_width = 800, plot_height = 400)
```

```
    times = np.arange(y.shape[0])
```

```
    p.scatter(times, y, line_width = 2, color = 'green'
```

```
    , legend_label = 'G')
```

```
    p.line(times, y, line_width = 2, color = 'green'
```

```
    , legend_label = 'G')
```

```
    p.scatter(times, model.predict(X), line_width = 2
```

```
    , color = 'red', legend_label = 'P') p.line(times, model.predict(X), line_width = 2
```

```
    , color = 'red', legend_label = 'P')
```

```
    show(p)
```

Застосуємо функції для побудови та оцінки самої простої регресійної моделі – лінійної (результати наведено на рисунку 2.15):

```
model = LinearRegression() model = create_evaluate_model(
```

```
model, X_trainval, y_trainval) visualize(model, X_trainval, y_trainval)
```

Видно, що точність моделі низька, оскільки вона не враховує, що нічні години мають нульову продуктивність, а денні – ні.

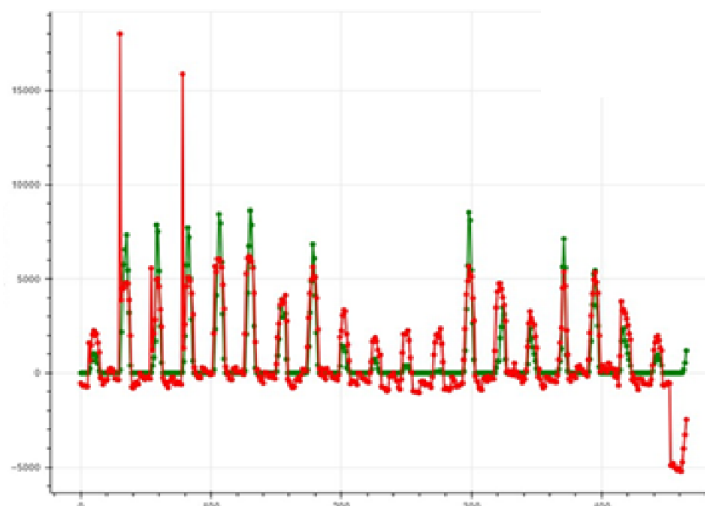


Рисунок 2.15 – Графік генерації при лінійній моделі

Після того, як модель і параметри моделі обрані за допомогою крос-валідації, її потрібно перевірити на тестовій вибірці:

```
print('Mean RMSE on test set:', int(calc_rmse( model, X_test, y_test)), 'kWh')
visualize(model, X_test, y_test)
```

Точність стала набагато вищою (рисунок 2.16). Помітний розрив між точністю на навчальній вибірці та результатами оцінки за допомогою крос-валідації (на навчальній помилка приблизно в 4 рази нижча). Це свідчить про перенавчання.

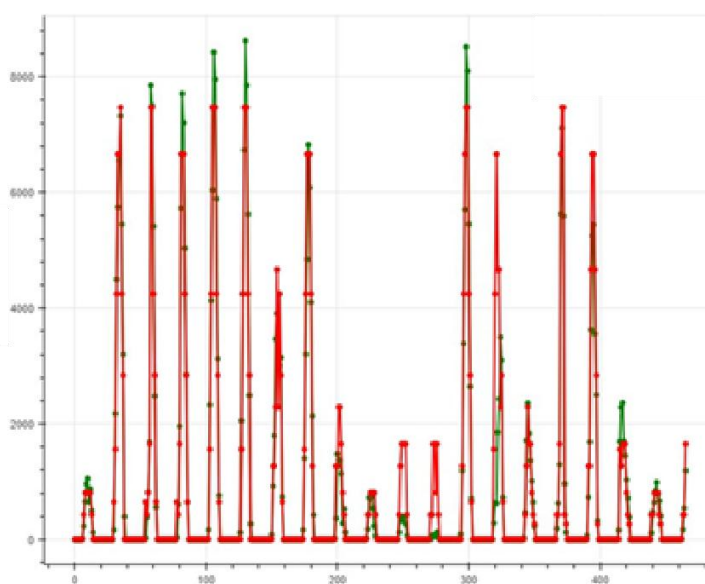


Рисунок 2.16 – Графік генерації при крос - валідації

## 2.6 Висновки до розділу 2

1. Створено моделі на основі машинного навчання для прогнозування електричної енергії від ВДЕ. Проведено порівняння лінійної регресії.
2. Показано залежність впливу налаштувань моделей машинного навчання, на їхні характеристики, такі як точність та стійкість до перенавчання.
3. Модель машинного навчання показала чудову точність прогнозу, оскільки середньоквадратична помилка складає лише 4 % від потужності. Це свідчить про високу ефективність моделі в даному контексті.

## 3 РОЗРАХУНКОВО - ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Методи пошуку оптимуму в багатofакторних моделях

Розглянуто основні режими електроспоживання в енергосистемі з урахуванням його сезонності. Завдання вирішується на основі методів лінійного програмування, продукційних правил «Якщо ..., То ...» і математичного моделювання режимів електроспоживання генеруючими споживачами. Встановлено, що електроспоживачі регіону у зв'язку з дефіцитом електроенергії мають можливість самостійно встановити додаткові генеруючі джерела енергії у вигляді вітроенергетичних установок, сонячних фотоелектричних станцій і накопичувачів енергії для її збереження. В якості цільової функції обрано мінімізацію фінансових витрат на власне електроспоживання, а також їх максимізацію від експорту та перерозподілу потоків електроенергії.

Передбачається повноцінний аналіз усталених режимів автономної енергосистеми з урахуванням напруги у вузлах і втратою активної потужності в мережі. Буде реалізована концепція відмови від лінії 35 кВ і 10 кВ для того, щоб отримати єдину модель електричної мережі.

Питання оптимального управління виробництвом/споживанням електроенергії в сучасних розподільних системах стає особливо актуальним в епоху Smart grid. Крім того, той факт, що робота автономних енергосистем з високим ступенем використання ВДЕ може створити значні проблеми з балансуванням системи, децентралізована інтеграція ВДЕ на основі інтелектуальної енергетичної системи Smart grid може стати найперспективнішим способом підвищення стійкості та надійності функціонування останніх – оптимальним, з точки зору витрат, способом. Важливо пам'ятати, що саме автономні інтелектуальні, інтегровані системи відновлюваної енергетики лежать в основі енергетичного пакету ЄС «Чиста енергія для всіх європейців», спрямованого на наданні сучасних енергетичних послуг прибережним, острівним і гірським регіонам, а також, в більш широкому сенсі, сільським/периферійним регіонам.

Гібридні системи відновлюваної енергетики (ГСВЕ) можуть значно відрізнятися за типом і кількістю джерел генерації, споживачів, встановленою потужністю, умовами експлуатації та багатьма іншими факторами.

Завдання оптимізації роботи генеруючих енергоустановок систем електропостачання з використанням ВДЕ, техніко-економічна оцінка енергопостачання ізольованих споживачів, економічне обґрунтування ефективності підключення до централізованого енергопостачання розглядається можливість використання місцевих малих джерел енергії на сьогоднішній день залишаються актуальними.

Для ізольованих систем повинні бути створені моделі для оптимізації системи управління розподіленою генерацією, що включає, в тому числі, і ВДЕ. Такі моделі дозволяють оптимізувати роботу мережі за різними параметрами. Існують різні методи оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем і мереж. Оптимальний метод застосовується для визначення розмірів для парків ВДЕ та накопичувачів енергії в гібридній енергосистемі. Генетичний алгоритм використовується для пошуку оптимальних рішень як для відновлюваних ферм, так і для пристроїв зберігання енергії.

В цілому, процес оптимізації можна розділити на одноцільові та багатоцільові методи. Наприклад, запропоновано метод оптимізації розмірів парків відновлюваної енергії разом з економічним аналізом для потреби в зарядці від мережі до 50 000 підключених електромобілів. Однак процес, який обмежує вплив коливань потужності ферми ВДЕ на комунальну мережу, не аналізується. Інший метод, заснований на аналізі витрат і вигод для оптимального розміру системи зберігання енергії, не вказує відповідний розмір ферми ВДЕ. Крім того, система накопичення енергії включає тільки використання акумуляторів, які можуть вийти з ладу в ситуаціях високих коливань потужності. Також запропоновано оптимальний метод визначення розмірів гібридної енергосистеми з вітровою сонячною батареєю як для автономного, так і для мережевого режиму (без ультраконденсатора).

Слід зазначити, що більшість початкових досліджень у цій галузі присвячено аналізу короткострокової експлуатації маломасштабних/автономних енергосистем

для тих випадків, коли вимоги до якості виробництва електроенергії здаються менш важливими. Проте деякі дослідження були спрямовані на вивчення довгострокової моделі оптимізації для гібридних систем гідро/фотоелектричних систем з урахуванням стабільності вихідної потужності та загального вироблення електроенергії одночасно шляхом створення багатоцільової моделі оптимізації для довгострокової роботи гідроелектростанції/фотоелектричної системи, яка потім оптимізується за допомогою модифікованої версії Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. У свою чергу, щоб поліпшити довгострокові додаткові експлуатаційні характеристики великомасштабної гібридної гідроелектростанції, були розроблені методи довгострокової стохастичної оптимізації, які одночасно враховують невизначеність потоку і вихідної потужності фотоелектричної установки. Була створена багатоцільова оптимізаційна модель для максимізації загального виробництва енергії та гарантованої швидкості. Потім модель була вирішена з використанням стохастичного динамічного програмування для отримання операційних рішень. Це дослідження було зосереджено на довгостроковій взаємодоповнюючій роботі гібридних електростанцій з гідроелектростанціями, враховуючи невизначеність як у потоці, так і в потужності фотоелектричної енергії.

### **3.2 Енергетичний баланс і умови оптимальних режимів енергосистеми**

Для оцінки енергетичного потенціалу автономної енергетичної системи України необхідно оцінити можливість використання альтернативних джерел. При цьому істотна відмінність режимів даної системи полягає в тому, що в зимовий період вона є енергодефіцитною, а в літній – енергопрофіцитною. У зв'язку з цим для зимового і літнього періодів обрано по одному найбільш характерному дню. Для оптимізації режимів електроспоживання були використані статистичні дані щодо зміни швидкості вітру, сонячної інсоляції, вироблення потужності гідроелектростанціями за рахунок водних ресурсів і добовий графік навантаження для обраного характерного дня.

Поряд з цим, при прогнозуванні потужності гідроелектростанцій і складу

гідроагрегатів, можна оцінити можливості покриття добового графіка за рахунок електроенергії, що виробляється ГЕС.

Потужність вітроенергетичної установки залежить від швидкості вітрового потоку, який сильно змінюється в часі, від погоди і поверхні місцевості. Залежність потужності і швидкості вітру, що проходить через окреслену площу вітроустановки, виражається наступною формулою:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda), \quad (3.1)$$

де  $P$  – площа повітряного потоку ( $\text{кг/м}^3$ ), що залежить від температури і тиску повітря;

$A$  – площа поверхні, що охоплюється лопатями ( $\text{м}^2$ );

$V$  – швидкість вітру ( $\text{м/с}$ );

$C_p$  – коефіцієнт ефективності вітроустановки;

$\lambda$  – коефіцієнт швидкохідності.

Для даної енергосистеми обрано сумарну встановлену потужність вітрового парку 10 МВт, яка складається з 6 вітроустановок потужністю по 1650 МВт. Відповідно до паспортних даних, вироблення потужності починається зі швидкості вітру 4 м/с. При досягненні швидкості 15 м/с виробляється номінальна потужність. У діапазоні 15 – 50 м/с підтримується номінальна потужність вітроустановок.

На рисунку 3.1 наведено дані швидкості вітру та сонячної інсоляції для одного зимового дня регіону.

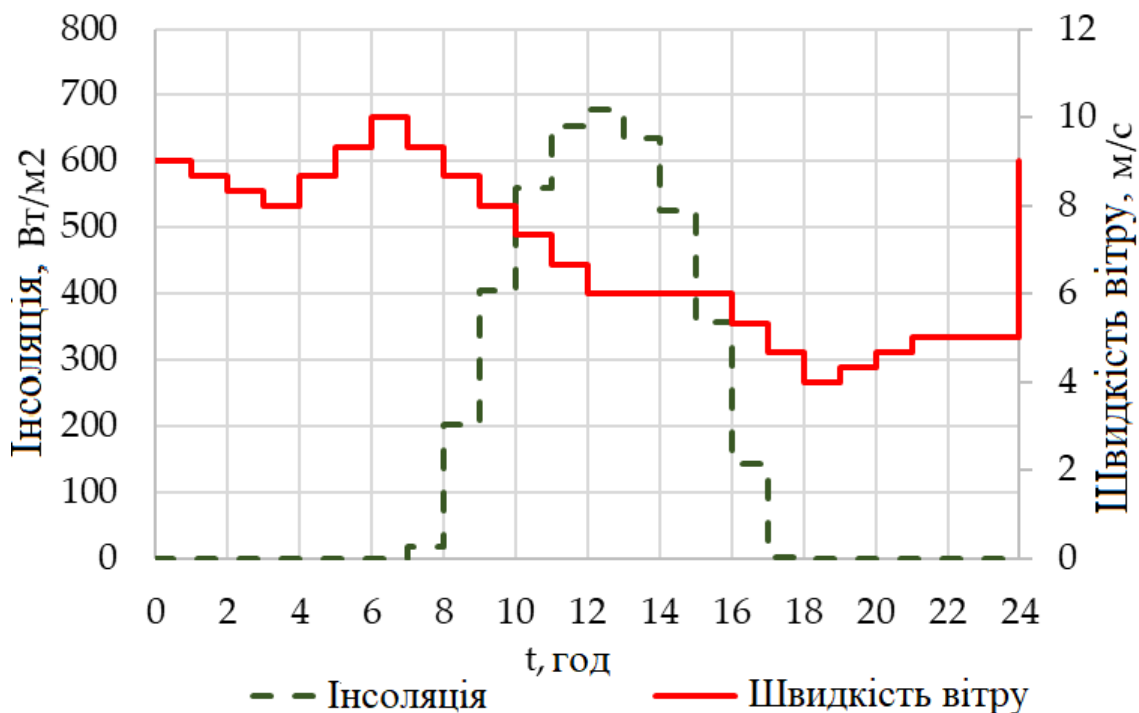


Рисунок 3.1 – Швидкість вітру та сонячна інсоляція характерного зимового дня.

З графіка видно, що найбільші значення швидкості вітру приблизно збігаються з ранковим максимумом електричного навантаження. Це сприяє використанню енергії вітру в ранкові години. Очевидно, що найбільшу потужність за рахунок сонячної енергії можна отримати з 8 до 18 год. Сумарна потужність сонячних батарей обрана 6 МВт при коефіцієнті корисної дії, рівному 20,65%.

Для характерного зимового дня вироблення потужності гідроелектростанціями за рахунок водних ресурсів, добовий графік навантаження, вироблена вітропарком потужність, а також вироблення потужності сонячними батареями обрані в якості вихідної інформації і наведені на рисунку 3.2. Поряд з цим, вихідна потужність накопичувача енергії на початок доби прийнята 2000 кВт, яка оптимальним чином відповідно до алгоритму оптимізації витрачається або накопичується з метою мінімізації фінансових витрат електроспоживачів.

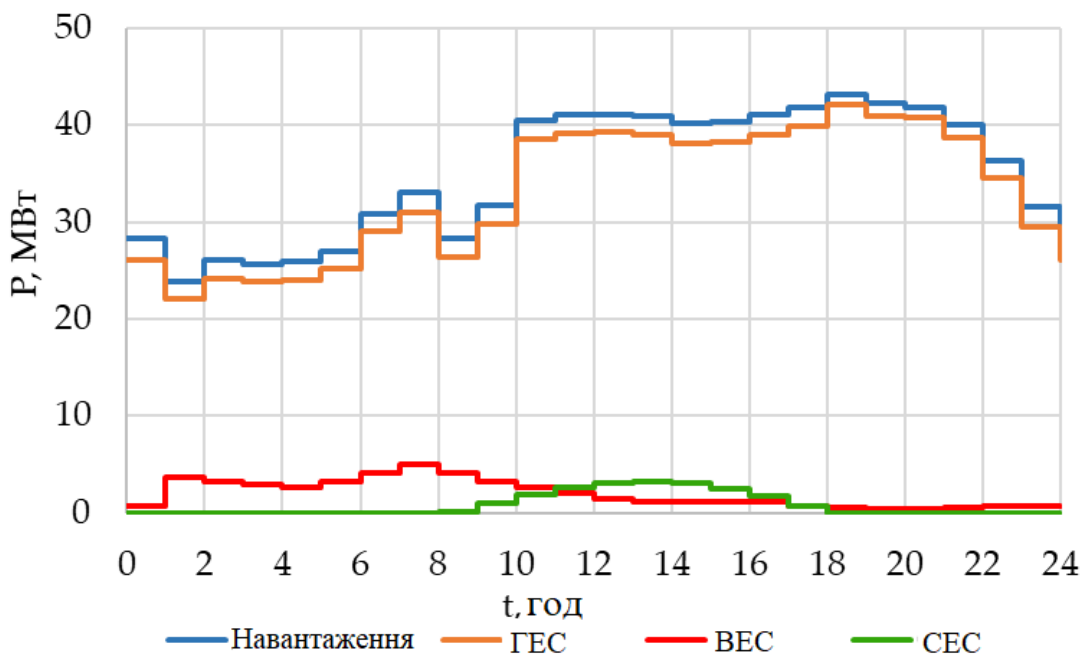


Рисунок 3.2 – Вихідна інформація енергетичного балансу для характерного зимового дня.

Сформуємо математичну модель оптимального електроспоживання. Основне завдання роботи полягає в тому, щоб запропонувати оптимальне поєднання 11 потенціалів великої та малої гідроенергетики разом з вітровими та фотоелектричними системами у вигляді гібридної системи, що підвищить надійність системи та інвестиційні витрати.

Розглянемо приклад оптимізації структури генерації енергосистеми України як ізольованої системи електропостачання.

Рівняння балансу потужності для даної автономної системи матиме такий вигляд:

$$P_{ГЕС} + P_{ВЕС} + P_{СЕС} \pm P_{н.е.} = P_H + \Delta P, \quad (3.2)$$

де  $P_{ГЕС}$  – потужність гідроелектростанцій;

$P_{ВЕС}$  – потужність вітроелектростанцій;

$P_{СЕС}$  – потужність сонячних електростанцій;

$P_{н.е.}$  – потужність накопичувачів енергії;

$P_H$  – споживана потужність навантаження;

$\Delta P$  – втрати електроенергії при передачі та розподілі.

Рівняння балансу в інтегральній формі має наступний вигляд:

$$\int_0^{24} P_{ГЕС}(t)dt + \int_0^{24} P_{ВЕС}(t)dt + \int_0^{24} P_{СЕС}(t)dt \pm \int_0^{24} P_{Н.Е.}(t)dt = \int_0^{24} P_H(t)dt + \int_0^{24} \Delta P(t)dt \quad (3.3)$$

Завдання мінімізації фінансових витрат окремого генеруючого електроспоживача вирішується на основі мінімізації цільової функції в припущенні, що погодинні вимірювання потужності та енергії чисельно збігаються.

$$\sum_{i=0}^{24} R_i P_{ГЕС} + \sum_{i=0}^{24} R_i P_{ВЕС} + \sum_{i=0}^{24} R_i P_{СЕС} \pm \sum_{i=0}^{24} R_i P_{Н.Е.} = \sum_{i=0}^{24} P_{iH} + \sum_{i=0}^{24} \Delta P_i, \quad (3.4)$$

де  $R_i$  – погодинна витрата електроенергії від даного виду джерела генерації;

$P_{ГЕС}$  – потужність, що споживається від ГЕС в  $i$ -й годині;

$P_{ВЕС}$  – потужність, що споживається від ВЕС в  $i$ -й годині;

$P_{СЕС}$  – потужність, що споживається від СЕС в  $i$ -й годині;

$P_{Н.Е.}$  – потужність, що споживається від накопичувачів енергії в  $i$ -й годині;

Зважаючи на необхідність мінімізації фінансових витрат кожного окремого електроспоживача, вираз 3.4 має бути змінений таким чином, щоб враховувати індивідуальні витрати на кожне альтернативне або відновлювальне джерело енергії. Це дозволить точно оцінити витрати для кожного джерела енергії з урахуванням його вартості, що в свою чергу забезпечить оптимізацію витрат на енергоспоживання.

$$\left( C_{ГЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{ГЕС} + C_{ВЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{ВЕС} + C_{СЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{СЕС} \pm C_{Н.Е.} \cdot \sum_{i=0}^{24} R_i P_{Н.Е.} \right) \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

де  $C_{ГЕС}$  – вартість електроенергії, виробленої на ГЕС;

$C_{ВЕС}$  – вартість електроенергії, виробленої на ВЕС;

$C_{СЕС}$  – вартість електроенергії, виробленої на СЕС;

$C_{Н.Е.}$  – вартість електроенергії, акумульованої на Н.Е.

У разі профіциту енергії подібне рівняння можна записати для максимізації доходів.

$$\left( k \cdot C_{ГЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{ГЕС} + k \cdot C_{БЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{БЕС} + k \cdot C_{СЕС} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{СЕС} \pm \right. \\ \left. \pm k \cdot C_{H.E.} \cdot \sum_{i=0}^{24} G_i P_{H.E.} \right) \rightarrow \max, \quad (3.6)$$

де:  $G_i$  – це надлишок електроенергії в  $i$ -й годині для кожного джерела енергії;

$k$  – коефіцієнт прибутковості від продажу електроенергії.

Поряд з цим, виходячи з балансу потужності в години максимуму добового графіка навантаження, обрано накопичувачі для збереження енергії з урахуванням непередбачуваності генерації «зеленої енергії». Виходячи з цього, зазначені вище рівняння необхідно вирішувати при обмеженнях у формі нерівностей, а саме:

$$12 \leq P_{ГЕС} \leq 43,5 \text{ MBm}; 0 \leq P_{БЕС} \leq 10 \text{ MBm}; \\ 0 \leq P_{СЕС} \leq 6 \text{ MBm}; 0 < P_{H.E.} \leq 5 \text{ MBm}.$$

Обмеження для ГЕС становить від 12 до 43,5 МВт, що обумовлено роботою водосховища ГЕС до рівня мертвого об'єму.

Крім того, в якості додаткового електроспоживача може бути врахована можливість передачі електроенергії за кордон, який закуповує надлишкову енергію в разі її профіциту в автономній енергосистемі України. Слід зазначити додаткову важливу обставину, яка полягає в тому, що баланс потужності та енергії в розглянутій системі може бути також врівноважений шляхом обмеження потужності, яка передається за кордон, однак він не може бути джерелом генерації в найближчому майбутньому.

### 3.3 Алгоритм рішення та його програмна реалізація

При вирішенні будь-якої оптимізаційної задачі в технічних системах необхідно вибрати математичний метод, який дозволив би отримати кінцеві результати з найменшими обчислювальними витратами або зумовив найбільший обсяг нової інформації про оптимальне рішення. Вибір методу, як правило, визначається постановкою оптимальної задачі і математичною моделлю. Відомі широко застосовувані методи вирішення оптимізаційних задач: дослідження функцій на основі класичного аналізу, метод невизначених множників Лагранжа, варіаційне числення, динамічне програмування, лінійне програмування, нелінійне програмування, градієнтні методи, генетичні алгоритми.

У даній роботі обрано в якості математичного методу оптимізації метод лінійного програмування.

Розглянута автономна енергосистема, основним джерелом генерації якої є ВДЕ, а в якості альтернативних джерел прийняті вітроенергетичні установки і сонячні електростанції. В якості балансуєчого джерела буде розглядатися накопичувач енергії.

Відповідно до запропонованого алгоритму на основі правил продукції та розробленої програми можуть бути виконані розрахунки для кожної доби на тому чи іншому сезонному інтервалі року. У нашому випадку, згідно з розрахунками, результати оптимального електроспоживання для характерного зимового дня наведені на рисунку 3.3.

Алгоритм передбачає, що в базову частину графіка навантаження включається генеруюче джерело з найменшою вартістю електроенергії. У зимовий період таким джерелом служать гідроелектростанції, тобто водні ресурси, а в літній період сонячна електростанція, тобто сонячна енергія.

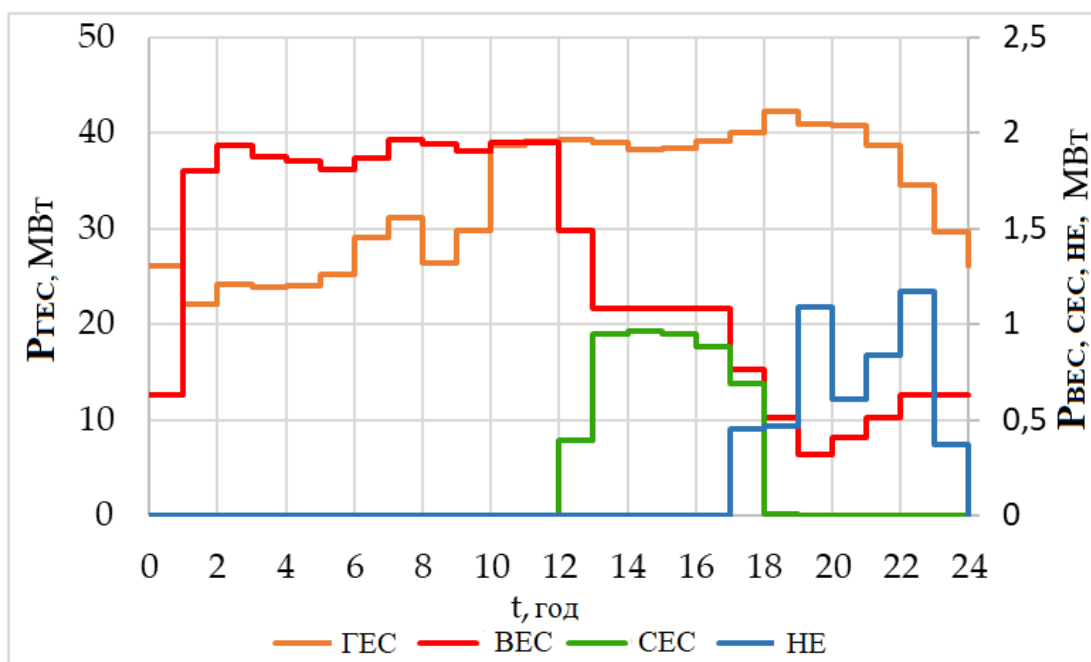


Рисунок 3.3 – Оптимальний склад альтернативних джерел і накопичувачів енергії для мінімізації витрат на електроспоживання.

У покритті пікової частини графіка навантаження використовується накопичувач енергії або альтернативні джерела енергії, якщо вони розвивають потужність.

Дослідження показало, що більшу частину добового інтервалу, крім періодів ранкового та вечірнього максимуму, відновлювані джерела можуть забезпечувати покриття електроспоживання. Однак у періоди піків навантаження виникає дефіцит активної потужності, який наразі призводить до відключення електроспоживачів або їх обмеження. Проблема буде вирішена при встановленні накопичувача енергії, який повинен здійснювати додаткову генерацію збереженої електроенергії з 17 до 23 годин. У ранкові години з 6 до 12 спостерігається висока швидкість вітрового потоку, що дозволяє зберігати енергію накопичувача.

При цьому режим накопичувача енергії з точки зору оптимального електроспоживання на добовому інтервалі виглядає наступним чином (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1

## Акумуляування електроенергії від різних джерел генерації

| Час, год | $P_{ГЕС}$ , кВт | $P_{ВЕС}$ , кВт | $P_{СЕС}$ , кВт |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0               | 1000            | 0               |
| 2        | 0               | 1000            | 0               |
| 3        | 0               | 1000            | 0               |
| 4        | 0               | 722             | 0               |
| 5        | 0               | 1000            | 0               |
| 6        | 0               | 278             | 0               |
| 7        | 0               |                 | 0               |
| 8        | 0               |                 | 0               |
| 9        | 0               | 0               | 0               |
| ...      | ...             | ...             | ...             |
| 24       | 0               | 0               | 0               |

Видно, що накопичення енергії доцільно здійснювати в нічний час з урахуванням того, що розряд літій-іонних акумуляторів не повинен бути нижче 20 % з точки зору продовження їх терміну служби.

В цілому, мінімальні фінансові витрати електроспоживачів на добовому інтервалі зимового дня будуть досягнуті при наступному співвідношенні альтернативних джерел генерації та накопичувача енергії (рисунок 3.4).

Показано, що завдяки оптимальному управлінню електроспоживанням на кожну годину добового інтервалу часу може бути досягнута мінімізація фінансових витрат на електроспоживання, як в цілому для регіону, так і для кожного електроспоживача, якщо він має власні джерела альтернативної генерації енергії. Такий підхід є новим і відповідає інноваційній пропозиції на короткострокову перспективу розвитку регіону.

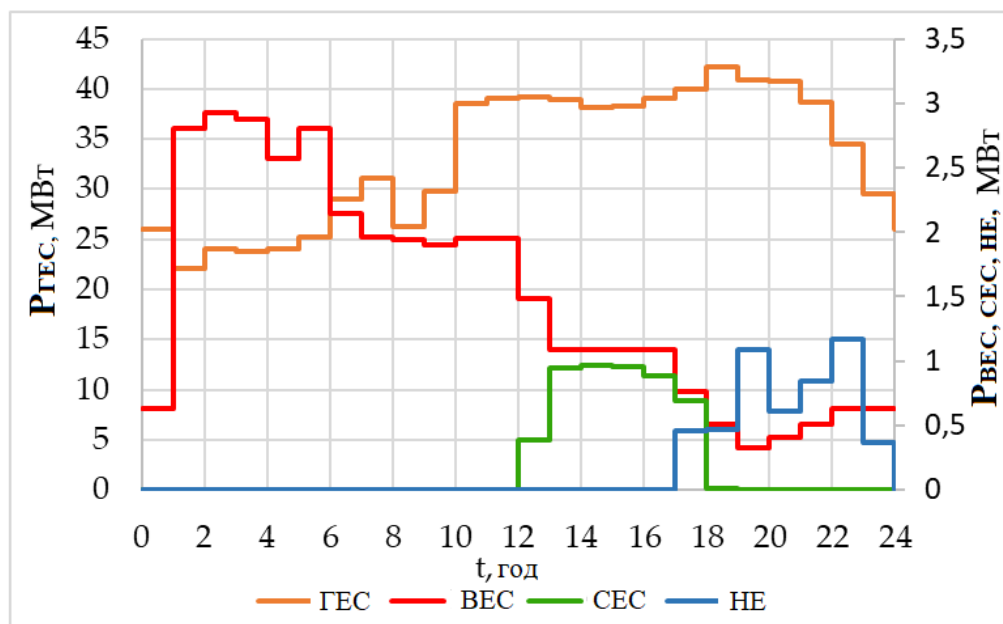


Рисунок 3.4 – Вибір генеруючих джерел і накопичувачів енергії для мінімізації фінансових витрат на електроспоживання.

Нижче в таблиці 3.2 наведено профіцит електроенергії від різних джерел енергії.

Таблиця 3.2

#### Профіцит електроенергії

| Час, год | $P_{ГЕС}$ , кВт | $P_{ВЕС}$ , кВт | $P_{СЕС}$ , кВт |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 2               | 3               | 4               |
| 1        | 0               | 861             | 0               |
| 2        | 0               | 340             | 0               |
| 3        | 0               | 30              | 0               |
| 4        | 0               | 0               | 0               |
| 5        | 0               | 463             | 0               |
| 6        | 0               | 1939            | 0               |
| 7        | 0               | 3058            | 0               |
| 8        | 0               | 2140            | 81              |
| 9        | 0               | 1364            | 969             |
| 10       | 0               | 622             | 1949            |

Продовження таблиці 3.2

| 1   | 2   | 3   | 4    |
|-----|-----|-----|------|
| 11  | 0   | 34  | 2688 |
| 12  | 0   | 0   | 2749 |
| 13  | 0   | 0   | 2310 |
| 14  | 0   | 0   | 2088 |
| 15  | 0   | 0   | 1572 |
| 16  | 0   | 0   | 833  |
| ... | ... | ... | ...  |
| 24  | 0   | 0   | 0    |

Аналіз режимів енергоспоживання представленого регіону показує, що для сезонного управління електроспоживанням необхідно в якості ключових вибрати найбільш завантажені робочі дні для зимового, весняного, літнього та осіннього сезонів року. Показано, що найбільш проблемні добові режими відносяться до зимового сезону, в той час як в літній період покриття всіх навантажень може здійснюватися за рахунок водних ресурсів, включаючи експорт надлишкової електроенергії. Картина докорінно змінюється взимку у зв'язку з необхідністю опалення, нагрівання води і більш високого рівня освітлення. Про експорт електроенергії вже не йдеться.

Запропонований метод і алгоритм оптимізації енергоспоживання дозволяють мінімізувати фінансові витрати декількох споживачів електроенергії, які мають можливість вибору джерела живлення з відновлюваних (енергія ГЕС) і альтернативних (енергія ВЕС і СЕС) джерел.

Розглянута модель включає в себе накопичувач енергії, який відіграє основну балансує роль в ЕС і тим самим дозволяє мінімізувати ризики недовиробництва енергії ВЕС, продиктовані непередбачуваним характером генерації останніх.

### 3.4 Аналіз встановлених режимів автономної електроенергетичної системи України

Автономні енергосистеми в Україні в даний час містять надмірну кількість трансформації електроенергії, а саме: 0,4 кВ; 6 кВ; 10 кВ; 20 кВ; 35 кВ, що значно ускладнює експлуатацію та аварійно-ремонтні роботи. Крім того вона заснована на самонесучих ізольованих проводах 20 кВ.

У зв'язку з цим, в роботі запропоновано нову концепцію побудови електричної мережі на одній напрузі 20 кВ. Суть автономної енергосистеми при цьому не змінюється, оскільки додаткове навантаження не отримує будь-якого іншого централізованого електроживлення. При цьому за рахунок зниження власного індуктивного опору фаз приблизно в 2-2,5 рази і збільшення ємнісної провідності в такій же мірі, хвильовий опір лінії знижується в 2-3 рази, а натуральна потужність лінії електропередачі зростає в 2-3 рази. Поряд з цим, межа передаваної потужності по лінії обернено пропорційна індуктивному опору і також збільшується приблизно в 2,5-3 рази, що забезпечує високу пропускну здатність ліній електропередач при мінімальних втратах реактивної потужності. Пропонований підхід є більш ефективним і менш фінансово витратним, ніж подовжнє підключення конденсаторних батарей для компенсації індуктивного опору.

Найбільш електродефіцитним є зимовий сезон, оскільки електроенергія водних ресурсів істотно обмежується. Нижче розглянуто ці режими. На початковому етапі розраховано вихідний усталений режим електричної мережі, за умови, що альтернативні джерела енергії відсутні.

Потокорозподіли для вищевказаних умов представлені на рисунку 3.5 для схеми, яка включає в себе 35 окремих елементів. Сумарні втрати активної потужності в мережі склали:

$$\Delta P_{\Sigma} = 2,191 \text{ МВТ}, \Delta Q_{\Sigma} = 5,122 \text{ МВАр}$$

На рисунку 3.5 показано, що напруга в вузлах досягає надмірних від'ємних відхилень від номінального, а саме до 16% від номінальної напруги. У зв'язку з цим відхилення напруг представлені на рисунку по осі ординат з від'ємним знаком.

На тлі цього для існуючої системи трансформації напруги розраховано розподіл потоку з підключенням додаткових генеруючих джерел на основі альтернативних джерел енергії. При цьому сумарні втрати активної та реактивної потужності становлять:

$$\Delta P_{\Sigma} = 1,264 \text{ МВт}, \Delta Q_{\Sigma} = 3,852 \text{ МВАр}$$

Тобто втрати активної потужності знижуються на 0,927 МВт, що становить 42,3 % від вихідної величини втрат. За реактивною потужністю зниження втрат становить 1,27 МВАр, що відповідає зниженню втрат на 24,8 %.

Відхилення напруг у вузлах значно зменшилися, при цьому максимальне відхилення не перевищує 8 %, що відповідає вимогам ДСТУ (рисунок 3.6).

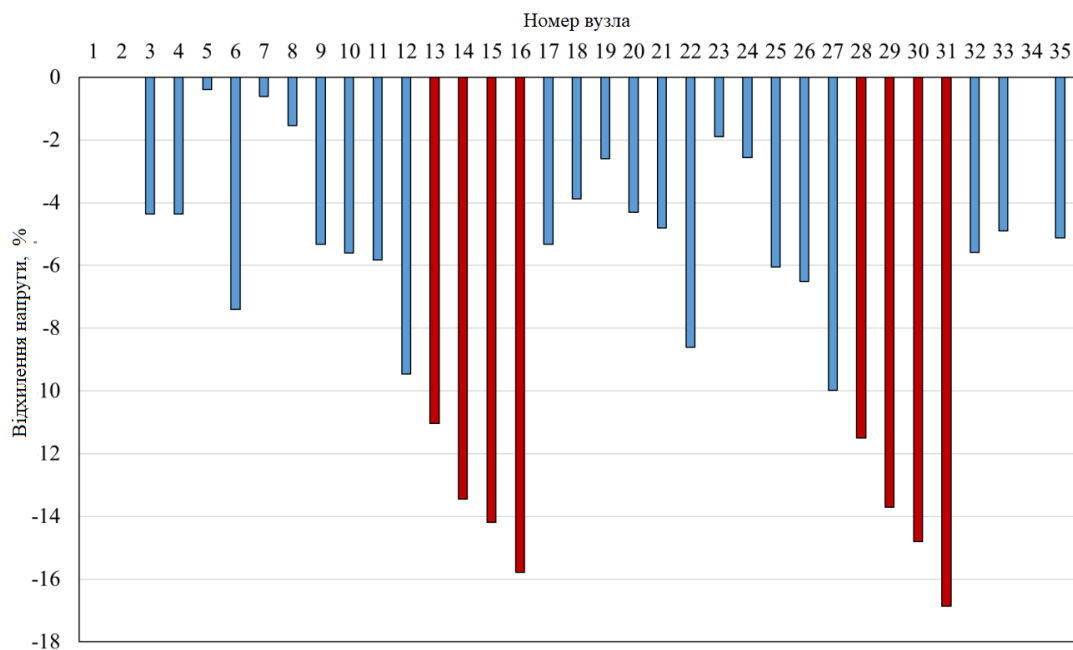


Рисунок 3.5 – Діаграма відхилення напруги в вузлах вихідного стаціонарного режиму.

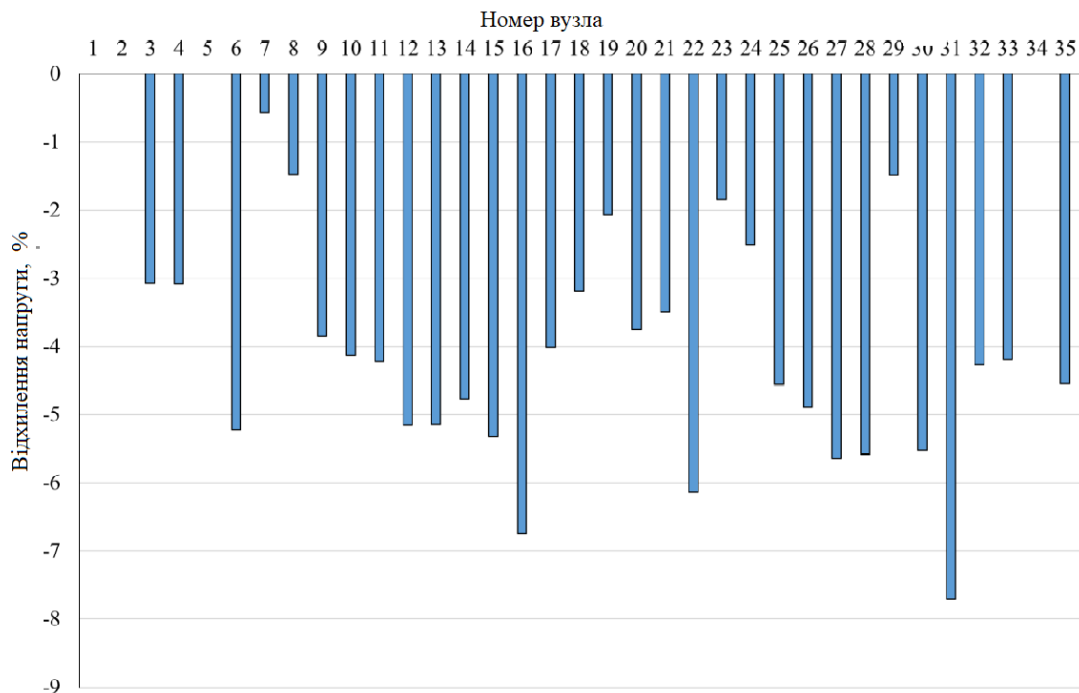


Рисунок 3.6 – Діаграма відхилення напруги в вузлах після підключення генеруючих вузлів з альтернативними джерелами енергії.

На наступному етапі розглянуто виконання електричної мережі з виключенням проміжних напруг 35 і 10 кВ. При цьому вся мережа автономної енергосистеми переводиться на самонесучий ізольований провід (СПП) напругою 20 кВ. Таке рішення передбачає, що електричні мережі будуть сумісні з електричними мережами 20 кВ, оскільки передбачається експорт надлишкової електроенергії.

Загальні втрати активної та реактивної потужності складатимуть:

$$\Delta P_{\Sigma} = 2,207 \text{ MBt}, \Delta Q_{\Sigma} = 2,554 \text{ MVar}$$

Тобто сумарні втрати активної потужності практично залишилися незмінними в порівнянні з вихідним режимом, а сумарні втрати реактивної потужності знизилися в два рази.

Відхилення напруг знаходяться в межах встановлених норм і не перевищують 10 % від номінального значення напруги, які показані на рисунку 3.7.

Крім того, був розрахований варіант зі збереженням напруги 35 кВ.

Загальні втрати активної та реактивної потужності складатимуть:

$$\Delta P_{\Sigma} = 1,019 \text{ МВт}, \Delta Q_{\Sigma} = 2,437 \text{ МВАр}$$

Тобто  $\Delta P_{\Sigma}$  знизилася в порівнянні з мережею 20 кВ удвічі, а втрати реактивної потужності залишилися незмінними. Напруги в вузлах при цьому, як видно з рисунка 3.8, знижуються не більше ніж на 6 % відносно номінального значення.

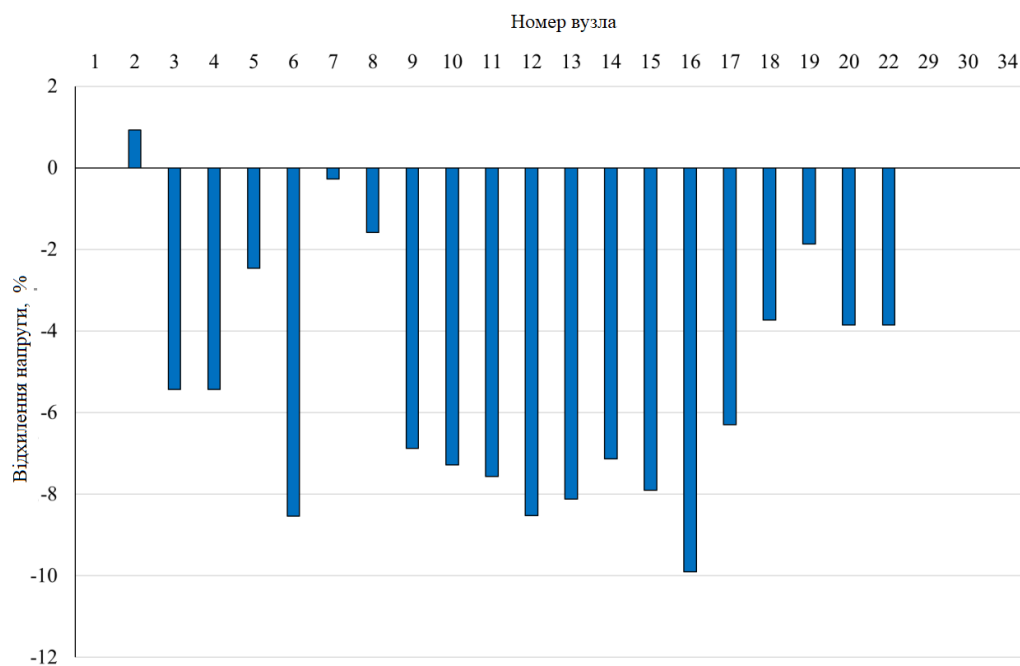


Рисунок 3.7 - Діаграма відхилення напруги в вузлах при переході мережі на СП 20 кВ.

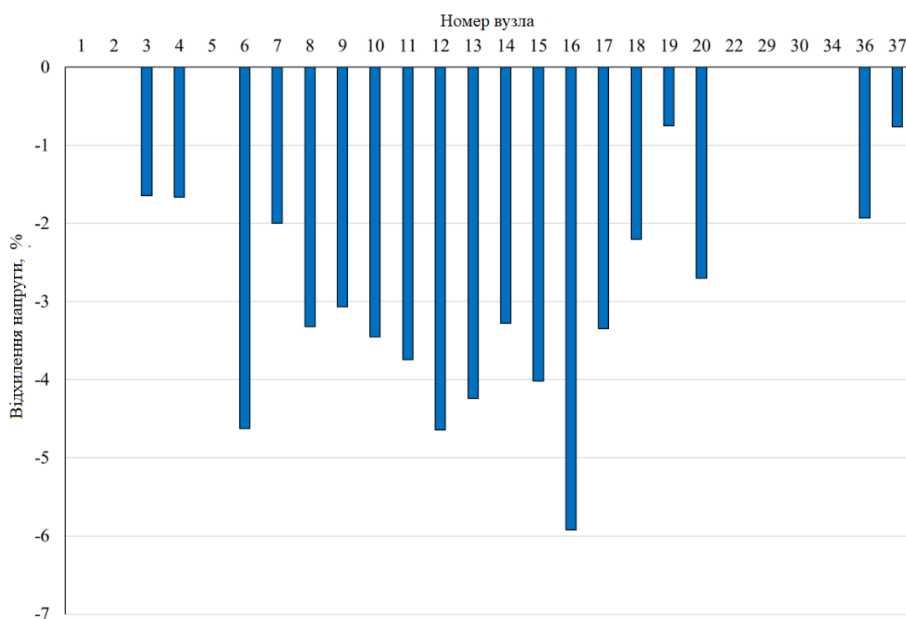


Рисунок 3.8 – Діаграма відхилення напруги в вузлах при переході на СІП 35 і 20 кВ.

У порівнянні з вихідним режимом дане конкретне виконання електричної мережі дає найкращий результат як у частині зниження активних і реактивних втрат потужності, так і у відношенні найменшого відхилення напруги у вузлах від номінального. У вихідному режимі сумарні втрати активної потужності становили 2,191 МВт, а в пропонованому виконанні 1,019 МВт, що свідчить про зниження втрат більш ніж у 2 рази, на 1,172 МВт, тобто на 53,5 %. Сумарні втрати реактивної потужності в вихідному режимі становили 5,122 МВАр, а в пропонованому виконанні 2,437 МВАр, тобто зниження на 2,685 МВАр, що становить 52,4 %.

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Проведене дослідження було мотивоване необхідністю підвищення економічної життєздатності інтегрованих систем відновлюваної енергетики, і зокрема автономних МЕСМ, що не тільки відіграє центральну роль в інтеграції змінних ВДЕ в рамках глобальних зусиль щодо вирішення проблеми зміни клімату та децентралізації енергетики.

2. Запропонований метод і алгоритм оптимізації енергоспоживання для мінімізації фінансових витрат окремих генеруючих споживачів дозволяють мінімізувати фінансові витрати декількох споживачів електроенергії.

3. Результати обчислювальних експериментів представлені в таблицях і рисунках. Їх систематичний системний аналіз показує, що кожен споживач, який генерує енергію, може самостійно мінімізувати свої витрати на електроенергію і максимізувати вигоду від обміну.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Умови безпечної експлуатації гідротехнічних споруд на ГЕС

Під час експлуатації гідротехнічних споруд повинна бути забезпечена їхня безпека та надійна робота, а також безперебійна й економічна робота технологічного устаткування з дотриманням вимог охорони навколишнього середовища. Особливу увагу слід звернути на забезпечення надійності роботи протифільтраційних і дренажних пристроїв.

Гідротехнічні споруди (підпірні греблі й дамби, канали, тунелі, трубопроводи, водозабори і водоскиди, дамби тощо) повинні відповідати нормативним (проектним) вимогам щодо стійкості, міцності, довговічності та екології. Споруди і конструкції, що знаходяться під напором води, а також їхні основи і примикання повинні відповідати нормативним (проектним) показникам водонепроникності і морозостійкості.

Гідротехнічні споруди повинні охоронятися від пошкоджень, викликаних несприятливими фізичними, хімічними і біологічними процесами, впливом навантажень і води. Виявлені пошкодження повинні бути своєчасно усунені. Усі напірні гідротехнічні споруди, які перебувають в експлуатації понад 25 років, незалежно від їхнього стану, повинні періодично піддаватися багатофакторному дослідженню з урахуванням процесів "старіння" і з оцінкою їхньої міцності, стійкості і експлуатаційної надійності із залученням спеціалізованих організацій. За результатами досліджень повинні бути вжиті заходи щодо забезпечення працездатності споруд.

У бетонних гідротехнічних спорудах згідно з графіком і обсягом, затвердженим технічним керівником енергооб'єкту, повинна проводитися перевірка міцності бетону на ділянках, які зазнають дії динамічних навантажень, регулярного промерзання і розташовані у зонах постійної зміни рівня. Виявлені пошкодження, зумовлені впливом води та навантажень, повинні своєчасно усуватися. У разі зниження міцності конструкцій споруд порівняно з встановленою проектом, вони повинні бути підсилені.

Ґрунтові греблі і дамби повинні бути захищені від розмивів і переливів води через гребінь. Кріплення відкосів, дренажна і водовідвідна мережі повинні бути у справному стані. Ґрунтові греблі, особливо канали в насипах і водопроникних ґрунтах, а також дамби повинні бути захищені від пошкодження тваринами. Берми і кювети каналів повинні регулярно очищатися від ґрунту, не повинно допускатися заростання укосів і гребня земляних споруд деревами і кущами, якщо це не передбачене проектом. На підвідних і відвідних каналах у необхідних місцях повинні бути встановлені сходи, містки й огорожі.

Повинна бути забезпечена надійна робота ущільнень деформаційних швів. Розміщення вантажів і будівництво будь-яких споруд, у тому числі причалів, автомобільних і залізничних доріг на бермах і відкосах каналів, гребель, дамб і біля підпірних стінок у межах розрахункової призми обвалення, забороняється. Небезпечна зона обвалення повинна бути позначена на місцевості розпізнавальними знаками. На ділянках відкосів ґрунтових гребель і дамб при високому рівні ґрунтових вод у низовому кліні для уникнення промерзання і руйнування повинен бути обладнаний дренаж або утеплення.

Дренажні системи для відведення води, що профільтрувалася, повинні бути оснащені водомірними пристроями і утримуватися у справному стані. Вода з дренажних систем споруд повинна відводитися безперервно. У разі виявлення виносу ґрунту водою, що фільтрується, повинні бути вжиті заходи для його припинення. Суглинкові ядра і екрани ґрунтових гребель повинні захищатися від морозного випинання і промерзання, а дренажні пристрої і перехідні фільтри - від промерзання. Великоуламковий матеріал упорних призм, що зазнає сезонного заморожування і розморожування, повинен відповідати нормативним (проектним) вимогам з морозостійкості і через кожні 10-15 років експлуатації випробовуватися на механічну і зсувну міцність.

Під час експлуатації підземної частини ГЕС необхідно забезпечувати постійну робочу готовність pomp відкачування води, яка потрапляє внаслідок фільтрації або через непередбачені прориви з водопровідних трактів, справність вентиляційних установок, аварійного освітлення, запасних виходів.

## 4.2 Правила безперебійної роботи гідротурбінного обладнання

Під час експлуатації гідротурбінного устаткування повинна бути забезпечена безперебійна робота з максимально можливим для заданого навантаження і діючого напору коефіцієнтом корисної дії.

Гідроагрегати повинні працювати з повністю відкритими заслонами, установленими на турбінних водоводах. Граничне відкриття направляючого апарату гідротурбіни повинне відповідати максимально допустимому навантаженню гідроагрегату (генератора, генератора - двигуна) при даному напорі. Перепад рівнів на сміттєзбиральних ґратах не повинен перевищувати граничного значення.

Умови, які дозволяють пуск гідроагрегату, його нормальну та аварійну зупинку та незаплановану зміну навантаження повинні бути викладені в інструкціях з експлуатації, затверджених технічним керівником ГЕС, які знаходяться на робочих місцях оперативного персоналу. Значення всіх параметрів, які визначають умови пуску гідроагрегату та режим його роботи, повинні бути встановлені на підставі рекомендацій виробника та спеціальних випробувань.

Пуск гідроагрегату забороняється у таких випадках:

- при напорі, що виходить за межі допустимих значень, встановлених заводом-виробником гідротурбін;
- при несправності будь-якого із захистів, що діють на зупин устаткування;
- при дефектах системи регулювання гідроагрегату, що можуть призвести до перешкод у регулювання і нормального керування гідроагрегатом;
- при несправності пристроїв дистанційного керування, клапанів зривання вакууму, клапанів впуску повітря і системи гальмування гідроагрегату;
- при якості оливи, що не задовольняє норми експлуатаційні оливи і температурі нижчій від встановленої інструкціями заводу-виробника;
- при рівні оливи у підшипниках, зливному баці і повітряному котлі оливи напірної установки, нижчому від встановленого інструкціями заводу-виробника.

Під час експлуатації гідроагрегату шляхом огляду і систематичних вимірювань за допомогою стаціонарних і переносних приладів повинен бути організований контроль за роботою устаткування з періодичністю, вказаною в інструкціях з експлуатації.

Система технічного водопостачання гідроагрегату повинна забезпечувати охолодження опорних вузлів, статора і ротора генератора, змащення гумового турбінного підшипника та інших споживачів у всіх режимах роботи гідроагрегату.

Капітальний ремонт гідротурбін повинен проводитися один раз на 5-7 років. В окремих випадках за узгодженим дозволом допускається відхилення від установлених термінів.

#### **4.3 Заходи для забезпечення безперебійної роботи електрообладнання**

Експлуатація обладнання неминуче пов'язана з використанням електричної енергії. Електробезпека – це система організаційних, технічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, спричиняє термічну, електролітичну і біологічну дію, викликає місцеві і загальні електротравми. Дія електричного струму на організм людини супроводжується зовнішнім ураженням тканин та органів у вигляді механічних ушкоджень, електричних знаків електрометалізації шкіри, опіків.

Термічна дія струму виявляється в опіках окремих ділянок тіла, ураженні внаслідок високої температури кровоносних судин, нервових клітин, серця, мозку, що призводить до серйозних функціональних розладів.

На підприємствах теплопостачання споживачами електроенергії є: електроприводи, освітлювальні прилади, електроцит. Все це обладнання може стати небезпечним при виникненні короткого замикання, пробією ізоляції, оголення проводів, попадання струму на струмоведучі частини обладнання. Для уникнення небезпечної дії електричного струму на персонал котелень проводяться заходи з метою уникнення ураження працівників струмом.

Для забезпечення роботи електрообладнання використовується напруга 380 та 220 В, яка є смертельно небезпечна для людини. Вражаюча дія електричного струму при цій напрузі залежить від наступних факторів: величини і тривалості протікання струму через тіло людини, роду і частоти струму, індивідуальних властивостей людини. Людина починає відчувати струм величиною 0,6 – 1,5 мА. Струм 10-15 мА (при  $f = 50$  Гц) викликає судомі м'язів, які людина не може подолати сама. Цей струм називається пороговим невідпускаючим. При 100 мА і тривалості дії більше 0,5 с струм може спричинити зупинку або фібриляцію серця. Опір тіла людини різко падає в залежності від часу дії струму. Найбільш небезпечним є змінний струм з частотою 20 – 100 Гц. Постійний струм людина відчуває при 6-7 мА, пороговий невідпускаючий струм складає 50-70 мА, а фібриляційний – 300 мА.

Заходи по захисту, поділяють на заходи, які забезпечують безпеку при нормальному режимі роботи електроустановок, і заходи, які забезпечують безпеку при аварійних режимах. При нормальному режимі роботи безпека в електроустановках забезпечується наступними заходами:

- ізоляцією струмоведучих частин;
- виконання електричних мереж, ізольованих від землі;
- компенсацією ємнісної складової струму замикання на землю;
- недоступністю струмоведучих частин.

**Захисне заземлення** – це спеціальне електричне з'єднання з землею металічних не струмопровідних частин обладнання, які можуть опинитися під напругою. Заземлюючий пристрій складається з заземлювача і заземлюючого провідника, який з'єднує заземлюванні частини з заземлювачем. В якості заземлювачів використовують металічні конструкції і арматуру залізобетонних конструкцій, які мають сполучення з землею.

**Захисне відключення** – це швидкодіючий захист, який забезпечує автоматичне відключення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження людини електричним струмом. Установка автоматичного відключення, яка застосовується на котельнях повинна відповідати наступним вимоги: висока чутливість, малий час відключення, селективність роботи, самоконтроль і

надійність.

#### **4.4 Шляхи запобігання виникнення пожежі**

Як уже зазначалось, вибухопожежна безпека об'єкта забезпечується системами:

- попередження вибухів і пожеж;
- протипожежного та противибухового захисту;
- організаційно-технічних заходів.

Система попередження вибухів і пожеж має за мету не допустити виникнення вибухів і пожеж.

Заходи і засоби попередження утворення горючого середовища в кожному конкретному випадку визначаються реальними умовами, що розглядаються, вибухопожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, що використовуються у технологічному циклі.

Попередження утворення горючого середовища може забезпечуватись загальними заходами або їх комбінаціями, що наведені в ГОСТ 12.1.007.-91.

Найбільш радикальним заходом попередження утворення горючого середовища є заміна горючих речовин і матеріалів, що використовуються, на негорючі та важкогорючі.

Тому попередження виникнення в горючому середовищі або внесення до нього джерел запалювання є головним стратегічним пріоритетом у роботі щодо запобігання пожежам.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У відповідності з метою роботи були вирішені задачі дослідження та одержані наступні результати:

1. Проаналізовано сучасні методи прогнозування виробництва енергії з альтернативних джерел, зокрема використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення точності прогнозів у енергетичних системах.
2. Розроблено модель середньострокового прогнозування електроспоживання та генерації енергії з відновлювальних джерел на основі нейронних мереж з урахуванням погодних факторів та змінних кліматичних умов.
3. Запропоновано підхід до оптимізації генеруючого обладнання ізольованої енергетичної системи, що базується на прогнозних даних та аналізі потужностей різних джерел енергії.
4. Проведено порівняння методів машинного навчання та статистичних методів для прогнозування генерації енергії та споживання електроенергії, що дозволило виділити переваги та обмеження кожного підходу.
5. Визначено, що зміна клімату і нестабільні погодні умови можуть суттєво впливати на точність прогнозів, що підвищує необхідність використання адаптивних моделей з можливістю швидкого донавчання.
6. Розроблено програмне забезпечення, яке інтегрується з існуючими системами моніторингу та управління енергетичними мережами, зокрема для прогнозування, верифікації даних та оптимізації електроспоживання.
7. Досліджено значення точності прогнозування для ефективного управління енергосистемами, що сприяє забезпеченню енергетичної безпеки та зниженню витрат на енергетичне забезпечення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Оробчук Б. Я. Розробка пристрою вирівнювання в розподільних електромережах напругою 0,4 кВ / Б. Я. Оробчук, І. Амбрашук, Ю. Назаров // Матеріали МНТК „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 28-29 травня 2025 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2025. — С. 49–51.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.
4. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М. Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
5. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С. Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
6. Тарасенко М. Dependences of relative and absolute glazed area from configuration and common areas of window embrasure / М. Тарасенко, В. Бурмака, К. Козак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2018. – №1 (89). – С. 122-131.
7. Тарасенко М. Економічна ефективність багатотарифного обліку електроенергії в Україні / М. Тарасенко, К. Козак // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – №1. – С. 23-33.
8. Тарасенко М. Ways to save fuel and energy resources in daily graft / М. Тарасенко, К. Козак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2017. – №1 (85). – С. 101-108.

9. Оробчук Б., Балящук О. Дослідження стану якості електричної енергії за відхиленням напруги // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“. М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2024р.

10. Оробчук Б., Розмірчук О. Система моніторингу якості електроенергії на базі навчального тренажера. Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф., (Тернопіль, 29-31 травня 2024) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2024р.

11. Козирський В. В. Основи електропостачання: підруч. / Козирський В.В., Волошин С.М., – К.: Компрінт, 2021. – 497с.

12. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії: підручник / В. М. Охріменко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.

13. Кулик В.В., Затхей М.В. Підвищення точності прогнозу виробництва електроенергії фотоелектричними станціями на основі методу random forest. Вісник ВПІ. – 2024, – С. 52–61. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-52-61>.

14. Штучний інтелект в енергетиці: аналіт. доповідь / Суходоля О. М.– К. : НІСД, 2022. – 49 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>.

15. Інтелектуальні системи електропостачання. Навчальний посібник/ І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков – 2023. – 151 с.

16. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 02.12.2020. № 1556-р.URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>

17. Савченко О. А., Волобуєв А. С. Застосування технологій штучного інтелекту для прогнозування генерації енергії сонячними електростанціями. Інформаційні технології в сучасному світі: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 29 квітня 2025 р. – Харків: ДБТУ, 2025. – С. 478-479

18. Алексенко С.Д.; Ципленков Д.В. Прогнозування генерації фотоелектричних станцій за допомогою штучного інтелекту. – НТУ «ДП». Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна». 2025. – С.153-155.

19. Мельник Р. В., Мельник М. В. Метод прогнозування обсягів генерації енергії сонячною електростанцією. *Український журнал інформаційних технологій*. 2025. – т. 7, № 1. – С. 149–159.

20. Матушкін, Д. С. Огляд сучасних методів прогнозування сонячної енергії / Матушкін Д. С. // Матеріали Аспірантських читань пам'яті професора Артура ПРАХОВНИКА : збірник наукових праць (10-11 березня 2021 р., Київ ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2021. – С. 34-38.

21. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с. ISBN 978-966-641-9

22. Денисюк С.П., Стшелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2019. – № 3 – с.7-22.

23. Досвід розбудови розумних енергетичних мереж на міжнародному рівні: монографія / І. А. Вакуленко, С. І. Колосок, О. В. Кубатко та ін.; за ред. С. І. Колосок. Суми : Сумський державний університет, 2019. 109 с.

24. Використання технологій smart grid для підвищення ефективності електропостачання споживачів / Мороз О.М., Черемісін М. М., Попадченко С. А., Савченко О. А., Дюбко С. В. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3 (49) С. 45-50.

25. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку "інтелектуальних" електромереж у світовій практиці. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-Smart-Grid.pdf>.

26. Попадченко С. А. Аналіз світових тенденцій модернізації електричних підстанцій на сучасному етапі розвитку. *Енергетика та електрифікація*. – 2016. № 9. – С. 46-49.

27. Tanveer Ahmad, Dongdong Zhang, Chao Huang, Hongcai Zhang, Ningyi Dai, Yonghua Song, Huanxin Chen, Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities, Journal of Cleaner Production, Volume 289, 2021, 125834, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>.

28. Barhmi K, Heynen C, Golroodbari S, van Sark W. A Review of Solar Forecasting Techniques and the Role of Artificial Intelligence. Solar. 2024; 4(1):99-135. <https://doi.org/10.3390/solar4010005>.

29. Sobrina Sobri, Sam Koohi-Kamali, Nasrudin Abd. Rahim, Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review, Energy Conversion and Management, Volume 156, 2018, Pages 459-497, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.019>.

30. Techniques and the Role of Artificial Intelligence. Solar. 2024; 4(1):99-135. <https://doi.org/10.3390/solar4010005>.

31. Tsmots, I. G., Tesliuk, V. M., Podolsky, M. R., & Dubuk, V. I. (2020). Tools of visualization of power balances and analytical support of energy efficiency management of region. Ukrainian Journal of Information Technology, 2(1), 01–07. <https://doi.org/10.23939/ujit2020.02.001>.

32. Matushkin, D. S., Bosak, A. V., & Kulakovskiy, L. Y. (2020). Analysis of factors for predicting electricity generation by solar power plants. Energetics: Economics, Technology, Ecology, 4 (2020), 62. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2020.233597>.

33. Carey Scott. How EDF is using audio to monitor its nuclear power plant equipment. Computerworld. 2018. 06 Feb. URL: <https://www.computerworld.com/article/3427522/how-edf-is-using-audio-to-monitor-its-nuclear-power-plant-equipment.htm>.

34. Innovative Energy Start-Ups. A key vehicle for realising clean energy transitions / IEA. 2021. 29 June. URL: <https://www.iea.org/articles/innovative-energy-start-ups>

35. EUPHEMIA Public Description. Single Price Coupling Algorithm / Nord Pool. 2020. 12 Oct. [URL:https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/download-center/single-day-ahead-coupling/euphemia-publicdescription.pdf](https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/download-center/single-day-ahead-coupling/euphemia-publicdescription.pdf).