

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ  
МІКРО-ЕЛЕКТРОМЕРЕЖЕЮ НА ОСНОВІ  
ВІТРО-СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ

Виконав студент IV курсу, групи ЕТс-41

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Зозуляк А.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2024

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультетприкладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедраелектричної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П..

(підпис)(прізвище та ініціали)

« »2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступенябакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студентуЗозуляку Анатолію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботиРозробка системи управління мікро-електромережею на основі вітро-сонячної енергоустановки

Керівник роботи

д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» січня 2024 року № 4/7-47.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 14.06.2024

3. Вихідні дані до роботиМікромережа на основі відновлювальних джерел енергії (сонце і вітер) У випадку, коли енергії від відновлюваних джерел енергії недостатньо для підтримки навантаження, енергія буде братися з акумулятора

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Мікромережі
2. Фотоелектрична і вітрова система перетворення сонячної енергії
3. Модель сонячної фотоелектричної системи
4. Модель підвищувального перетворювача для фотоелектричних модулів
5. Алгоритм керування енергоспоживанням
6. Результати

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

1. Принципова схема мікромережі
2. Сонячна фотоелектрична система
3. Схематичне зображення моделі акумулятора
4. Блок-схема фотоелектричної системи
5. Блок-схема алгоритму Р&О
6. Блок-схема системи управління енергоспоживанням

[illegible]

## **КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

[illegible]

(підпис)

Зозуляк А.Ю.  
(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Тарасенко М.Г.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор. 71; рис. 33; табл. 7; креслень (презентацій) \_\_; джерел 22.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розробка системи управління мікро-електромережею на основі вітро-сонячної енергоустановки».

Метою роботи є аналіз режимів роботи житлової мікро-електромережі на основі вітро-сонячної енергоустановки із запропонованою системою управління.

У роботі проведено аналіз типів мікромереж і системи управління ними, охарактеризовано відновлювальні джерела енергії, що можуть бути задіяні в мікро-електромережах. Також провести аналіз та обрати методики для розрахунків фотоелектричного елементу, потужності фотоелектричної системи та вітрогенераторів й акумулятора. З використанням Simulink/MATLAB виконати моделювання кожного компонента для його характеристик. Проведено оцінку ефективності запропонованої системи управління при різних умовах експлуатації.

*Ключові слова:* МІКРО-ЕЛЕКТРОМЕРЕЖА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, ВІТРОГЕНЕРАТОР

## ЗМІСТ

### ВСТУП

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....                                                       | 8  |
| 1.1 Мікромережі .....                                                           | 8  |
| 1.2 Мікромережа постійного струму .....                                         | 10 |
| 1.3 Типи мікромереж.....                                                        | 12 |
| 1.3.1 Режим підключення до мережі .....                                         | 12 |
| 1.3.2 Автономна модель.....                                                     | 13 |
| 1.3.3 Енергетичне управління мікромережею .....                                 | 13 |
| 1.4 Фотоелектрична система перетворення сонячної енергії .....                  | 14 |
| 1.5 Система перетворення енергії вітру .....                                    | 16 |
| 1.6 Типи та компоненти вітрових турбін .....                                    | 17 |
| 1.7 Висновки до розділу .....                                                   | 19 |
| 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....                                         | 20 |
| 2.1 Математична модель фотоелектричного елемента .....                          | 20 |
| 2.2 Визначення потужності фотоелектричної системи .....                         | 21 |
| 2.3 Енергія вітру .....                                                         | 22 |
| 2.4 Процес акумулювання енергії.....                                            | 24 |
| 2.5 Параметри підвищувального перетворювача.....                                | 27 |
| 2.6 Висновки до розділу .....                                                   | 28 |
| 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ .....                                                    | 29 |
| 3.1 Методика розрахунку .....                                                   | 29 |
| 3.1.1 Модель фотоелектричної системи в Simulink/ MATLAB .....                   | 29 |
| 3.1.2 Розрахунок характеристик фотоелектричної системи .....                    | 31 |
| 3.1.3 Система відстеження точки максимальної потужності<br>(MPPT).....          | 32 |
| 3.1.4 Модель підвищувального перетворювача для<br>фотоелектричних модулів ..... | 33 |
| 3.1.5 Потужність вітрової турбіни .....                                         | 36 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.6 Акумуляторна батарея .....                                                   | 38 |
| 3.2 Алгоритм управління енергоспоживанням .....                                    | 41 |
| 3.3 Умови роботи системи управління енергією .....                                 | 42 |
| 3.4 Результати моделювання .....                                                   | 46 |
| 3.5 Висновки до розділу .....                                                      | 58 |
| 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....                              | 60 |
| 4.1 Фізичні основи електробезпеки .....                                            | 60 |
| 4.2 Інструктажі з охорони праці .....                                              | 61 |
| 4.3 Особливості електротравматизму, електричний струм як<br>чинник небезпеки ..... | 64 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                                            | 66 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                                             | 68 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні мікромережі складаються з кластеру відновлюваних джерел енергії та систем зберігання. Ці системи можуть працювати в автономному режимі для забезпечення потреб локальних навантажень. Через непостійний характер різних відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні системи, використання систем зберігання, таких як акумулятори, є неминучим для забезпечення високої надійності та стабільності мікромережі, особливо в автономному режимі, коли відсутнє резервне живлення від основної електромережі. Це вимагає розробки відповідної системи управління енергією.

**Мета кваліфікаційної роботи:** аналіз режимів роботи житлової мікро-електромережі на основі вітро-сонячної енергоустановки із запропонованою системою управління. Модель мікромережі буде використовувати акумуляторну батарею як резервну систему для зберігання енергії від непостійних джерел (фотоелектричних і вітрових), тоді як у випадку, коли енергії від відновлюваних джерел енергії недостатньо для підтримки навантаження, енергія буде братися з акумулятора.

Відповідно до даної мети ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналіз типів мікромереж і системи управління ними.
2. Охарактеризувати відновлювальні джерела енергії, що можуть бути задіяні в мікро-електромережах.
3. Провести аналіз та обрати методики для розрахунків фотоелектричного елемента, потужності фотоелектричної системи та вітрогенераторів й акумулятора.
4. З використанням Simulink/MATLAB виконати моделювання кожного компонента для його характеристик.
5. Провести оцінку ефективності запропонованої системи управління при різних умовах експлуатації.

**Структура роботи.** Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 71 арк. формату А4..



## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Мікромережі

Мікромережа - це кластер енергетичних систем (відновлюваних та/або невідновлюваних), які можуть працювати як незалежно, так і під'єднані до основної мережі, мета мікромережі - виробляти електроенергію змінного та/або постійного струму для споживачів [1]. Система мікромереж повинна управлятися належним чином, щоб вона могла економічно і надійно постачати вироблену енергію. Системи мікромереж повинні сприяти зменшенню глобального потепління, яке на сьогоднішній день вважається головною проблемою. Інша важливість мікромереж полягає в тому, щоб забезпечити місцевих споживачів, які можуть працювати незалежно від основної мережі, щоб у будь-який час генерація задовольняла попит. Більшість проблем мікромереж - це коливання потужності через мінливість або невизначеність відновлюваних ресурсів, таких як швидкість вітру та сонячне випромінювання. Тому, у випадку роботи автономно, необхідна належна система акумуляторів разом з надійною системою управління енергією [2], а у випадку з'єднання з електромережею - регулювання напруги, регулювання частоти, а також дотримання певних умов. В обох випадках необхідна керована система силової електроніки для управління автономною або підключеною до мережі роботою.

Мікромережа побудована таким чином, що вона складається з розподілених джерел енергії (РДЕ) і навантажень. У системі мікромереж джерела енергії та навантаження повинні підключатися і відключатися від електромережі без порушення роботи локальних навантажень. Розподілені енергетичні ресурси (РЕР) можна розділити на дві групи: розподілену генерацію (РГ) та розподілене зберігання (РЗ). До РДЕ відносяться системи, які виробляють теплову, електричну або одночасно електричну та теплову енергію, або системи комбінованого виробництва теплової та електричної енергії (ТЕЦ). ВДЕ можна розділити на дві групи: керована розподілена генерація (КРГ), така

як гідротурбіни, паливні елементи та мікротурбіни, та некерована розподілена генерація (НРГ), така як фотоелектричні (ФЕ), вітрові турбіни та теплові колектори. Таким чином, для (CDG) вони можуть лише забезпечувати попит на енергію, вихідна потужність (CDG) може регулюватися на мінімальному і максимальному рівні, тоді як для (NCDG) їхня вихідна потужність змінюється відповідно до мінливості відновлюваних ресурсів, таких як швидкість вітру і сонячне випромінювання. Системи розподіленого зберігання (DS) є ключовим компонентом мікромережі завдяки своїй здатності зберігати енергію для задоволення попиту в будь-який час. До РС відносяться акумулятори, електромобілі, маховики тощо. На рис. 1.1 показано схему структури мікромережі, що складається з ВДЕ, систем накопичення енергії та навантажень.

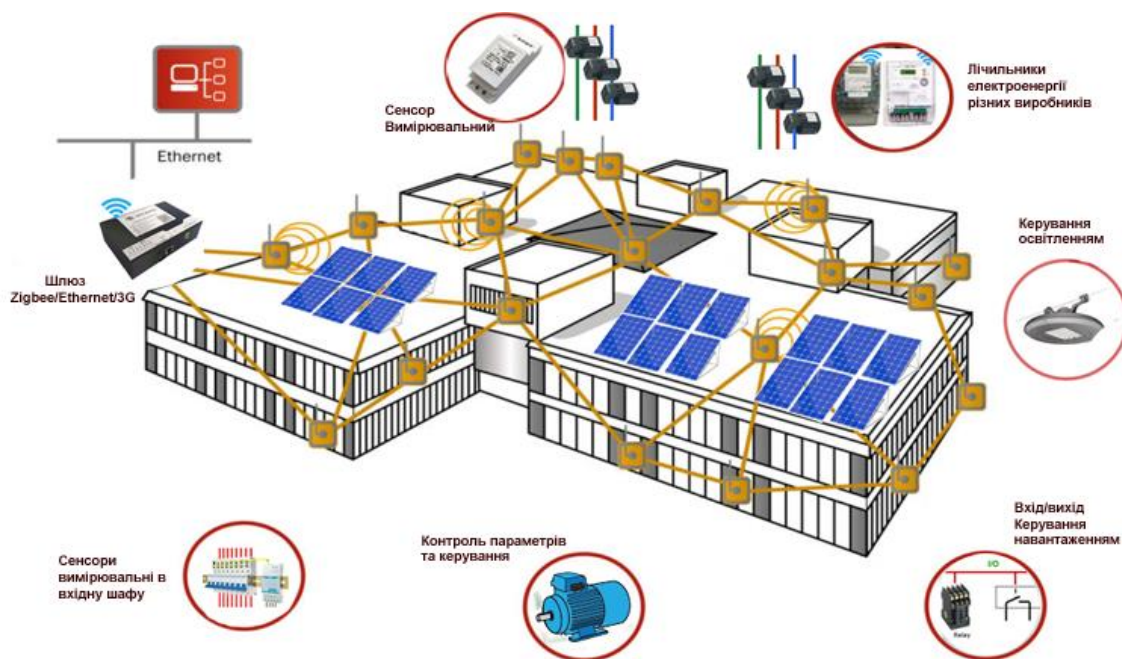


Рисунок 1.1 - Принципова схема мікромережі

Існує три різних типи мікромереж залежно від потужності, що генерується, як показано на рис. 1.2, отже, ці три типи мікромереж - це мікромережа змінного струму, яка виробляє електроенергію змінного струму, мікромережа постійного струму, яка виробляє електроенергію постійного струму, і мікромережа змінного і постійного струму, яка відома як гібридна система мікромережі змінного/постійного струму.

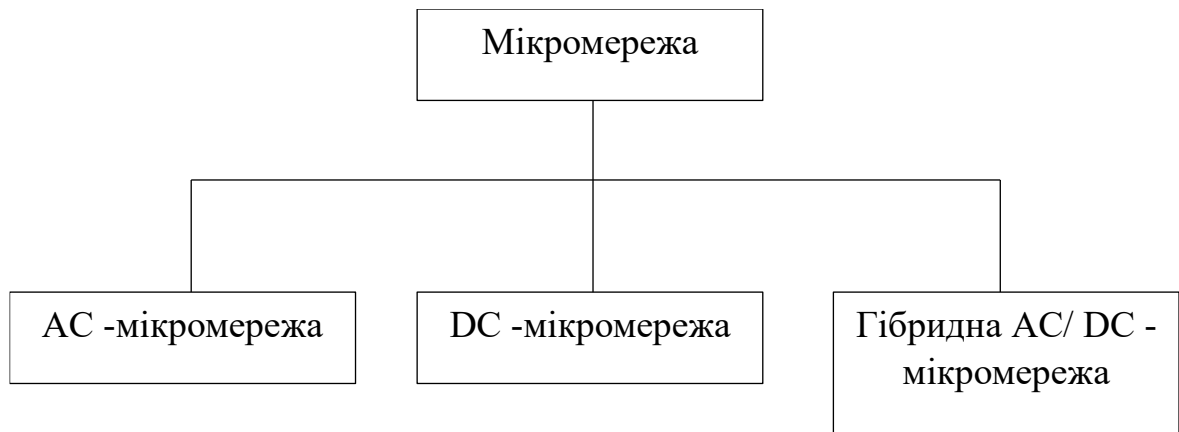


Рисунок 1.2 - Типи мікромереж на основі різних типів генерованої енергії

## 1.2 Мікромережа постійного струму

Мікромережа постійного струму складається з генеруючих одиниць, які виробляють електроенергію постійного струму як вихідну потужність, підключену безпосередньо до шини постійного струму, таких як фотоелектричні панелі, акумуляторні батареї та паливні елементи, або це може бути джерело змінного струму, але підключене до шини постійного струму через випрямляч змінного струму в постійний струм [1]. Мікромережа постійного струму може використовуватися як в автономному режимі, так і в режимі підключення до мережі, вона має багато переваг, таких як висока ефективність, надійність і невеликий розмір, оскільки мікромережі постійного струму не використовують трансформатори, а також використовують два кабелі замість трьох або чотирьох кабелів, як у мікромережах змінного струму. Більшість звичайних навантажень - це навантаження постійного струму, які можна підключити безпосередньо до мікромережі постійного струму без будь-якого перетворення енергії. Електроенергія постійного струму може передаватися з низькими втратами. Мікромережа постійного струму все ще має багато проблем, найважливішою з яких є усунення несправностей, оскільки відсутність захисних пристроїв, таких як автоматичні вимикачі, захисні реле та запобіжники, робить систему мікромережі постійного струму небезпечною для управління у разі виникнення несправностей. На рис. 1.3 показана принципова

схема мікромережі постійного струму.

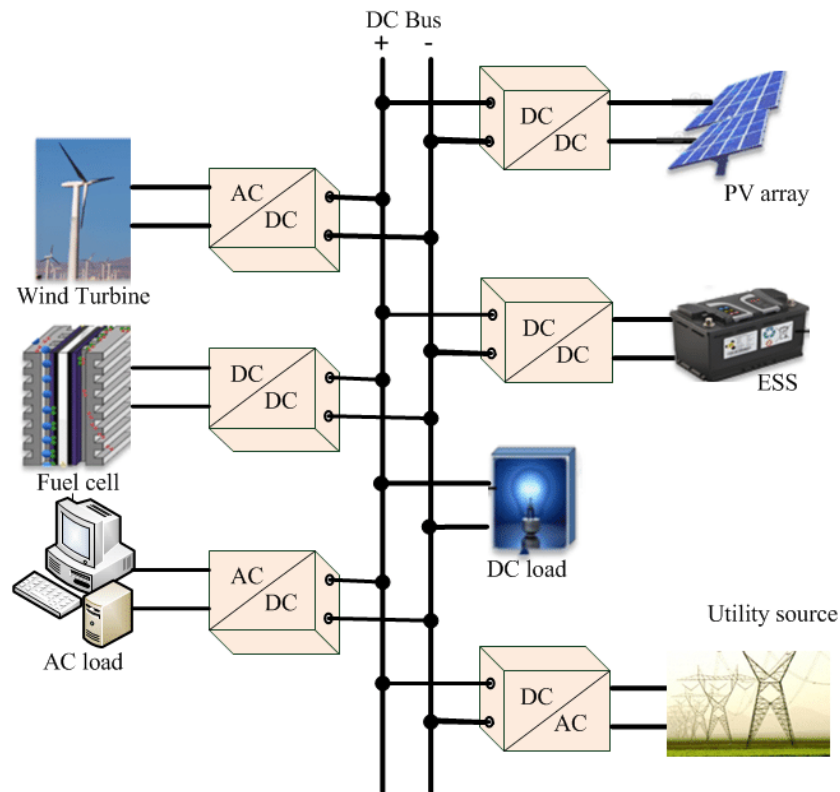


Рисунок 1.3 - Принципова схема мікромережі постійного струму

Мікромережі змінного струму виробляють електроенергію змінного струму на виході, підключеному безпосередньо до шини змінного струму. Мікромережі змінного струму використовують ДВДЕ, такі як система генерації на основі біогазу та система перетворення енергії вітру. Вони можуть працювати в гібридному режимі з системами генерації постійного струму, підключеними до шини змінного струму через інвертор постійного струму. Мікромережі змінного струму мають багато переваг завдяки своїй природі та схожості за потужністю з мережею, яка завжди є мережею змінного струму, і є багато компонентів, призначених для використання енергії змінного струму. Є й інші переваги використання розподіленої генерації змінного струму, оскільки мікромережа змінного струму може генерувати як активну, так і реактивну енергію для споживача, покращуючи баланс потужності між генерацією та споживанням.

Гібридні мікромережі містять як мікромережі змінного струму, так і мікромережі постійного струму. Цей тип мікромереж може працювати з

різними типами навантажень. Це можливо завдяки його гібридній природі, яка може забезпечувати як змінний, так і постійний струм. В рамках мікромережі споживач може виробляти електроенергію і продавати її назад в загальну мережу, у випадку підключення до мережі це допомагає споживачам підвищити свою економіку. Єдиним недоліком гібридної мікромережевої системи є вимога скоординованого алгоритму управління.

### 1.3 Типи мікромереж

#### 1.3.1 Режим підключення до мережі

Існує два типи мікромереж за моделлю роботи: підключені до мережі та автономні (автономні або острівні).

Режим підключення до мережі передбачає обмін активною та реактивною потужністю з основною мережею. Підключення до мережі підвищує стабільність мікромережевої системи, оскільки система може працювати навіть за відсутності одного з РДЕ мікромережі. Таким чином, переваги підключеної до мережі мікромережі є більш привабливими, ніж автономних мікромереж, крім того, енергія, що генерується DER з відновлюваних джерел енергії, може бути використана безпосередньо або збережена в акумуляторах і повернута в загальну мережу. Таким чином, для мікромереж, підключених до електромережі, система зберігання не є необхідною. На рисунку 1.4 показано схематичну конструкцію підключеної до мережі системи.

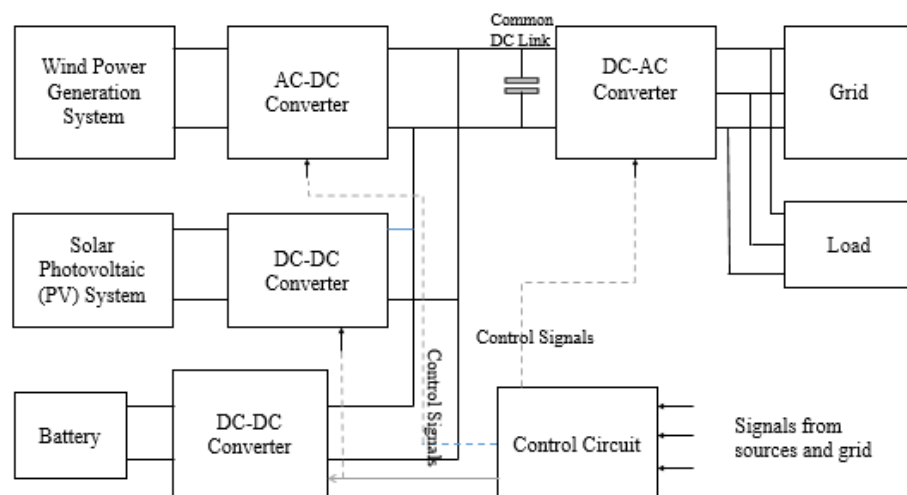


Рисунок 1.4 - Принципова схема системи, підключеної до електромережі

### 1.3.2 Автономна модель

Автономні мікромережі потребують системи зберігання для надійної роботи, оскільки у випадку, якщо виробництво енергії перевищує попит на неї, надлишкова енергія зберігається в системі зберігання, тоді як у випадку, якщо виробленої енергії недостатньо для задоволення попиту на неї, система зберігання буде необхідна для підтримки навантаження. Таким чином, автономні мікромережі потребують системи зберігання енергії в якості резервного джерела. Основною перевагою автономної мікромережі є те, що вона може бути реалізована будь-де, незалежно від наявності інфраструктури, а основними недоліками є невизначеність відновлюваних ресурсів, таких як фотоелектричні системи, що працюють лише вдень через наявність сонячного випромінювання, та вітер, який не доступний постійно.

### 1.3.3 Енергетичне управління мікромережею

Незважаючи на величезний розвиток технологій виробництва енергії, енергією потрібно керувати, щоб уникнути невідповідності між навантаженням і виробництвом. Тому можуть бути впроваджені різні системи управління енергією, щоб забезпечити розподіл та управління доступною енергією, такі як автомат, PID-регулятор, нечітка логіка тощо [3]. Ці методи енергоменеджменту мають однакові принципові цілі, але кожна з них має свій спосіб управління енергією. У наступних розділах ми детально розглянемо найважливіші методи енергоменеджменту.

Діаграма станів, також відома як діаграма станів або діаграма автомата, - це перехід між станами, яких може досягти об'єкт, а також ілюстрація станів на уніфікованій мові моделювання (UML). Діаграма станів також може моделювати поведінку окремого об'єкта, визначаючи послідовність подій, через які об'єкт проходить протягом свого життя у відповідь на події. Однак, завдяки своїй простоті, діаграми станів можна застосовувати в багатьох додатках.

Діаграми станів можуть показати, як об'єкт реагує на різні події, переходячи з одного стану в інший.

Нечітка логіка - це машина, яка використовує перетворену природну людську мову у формі математичної логіки, в якій істина може приймати континуум значень між 0 і 1, і була винайдена професором Лотфі Заде в середині 1960-х років. Він використовує змінну лінгвістику і може забезпечити простий спосіб отримання визначених висновків як з неоднозначної, так і з нечіткої інформації. Він має вбудовані значення з декількома станами, такими як (неправда/правда/частково неправда/абсолютно правда і т.д.). Структура нечіткої логіки представлена і складається з різних частин, включаючи вхід, фаззифікатор, механізм виведення, деємульгатор, вихід і базу нечітких знань. Завдяки своїй здатності враховувати невизначеність і неточності, нечітка логіка забезпечує високу гнучкість міркувань.

Існує багато відмінностей між програмою автомата і системою нечіткої логіки, найпоширеніша з яких полягає в тому, що обидві використовуються для управління енергією між різними джерелами і різним навантаженням. З точки зору змінного навантаження нечітка логіка реагує швидше, ніж програма автомата, і є більш надійною у випадку вимірювання невизначеності. Для випадку фіксованого навантаження та великого навантаження автомат є більш точним. Автомат має набагато більше переваг, таких як легкість у розробці, легкість у додаванні інших станів, легкість у тестуванні та легкість у прогнозуванні.

#### **1.4 Фотоелектрична система перетворення сонячної енергії**

Системи сонячних панелей використовуються як системи перетворення енергії сонячного випромінювання у світло або тепло [4-10]. Сонячні фотоелектричні (ФЕ) системи перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію для живлення навантажень постійного або змінного струму за допомогою силових електронних перетворювачів, а сонячні теплові системи



перетворюють сонячне випромінювання в тепло, яке використовується для підігріву води та комбінованого виробництва теплової та електричної енергії (ТЕЦ). Три типи систем перетворення сонячної енергії показані на рисунку 1.5.

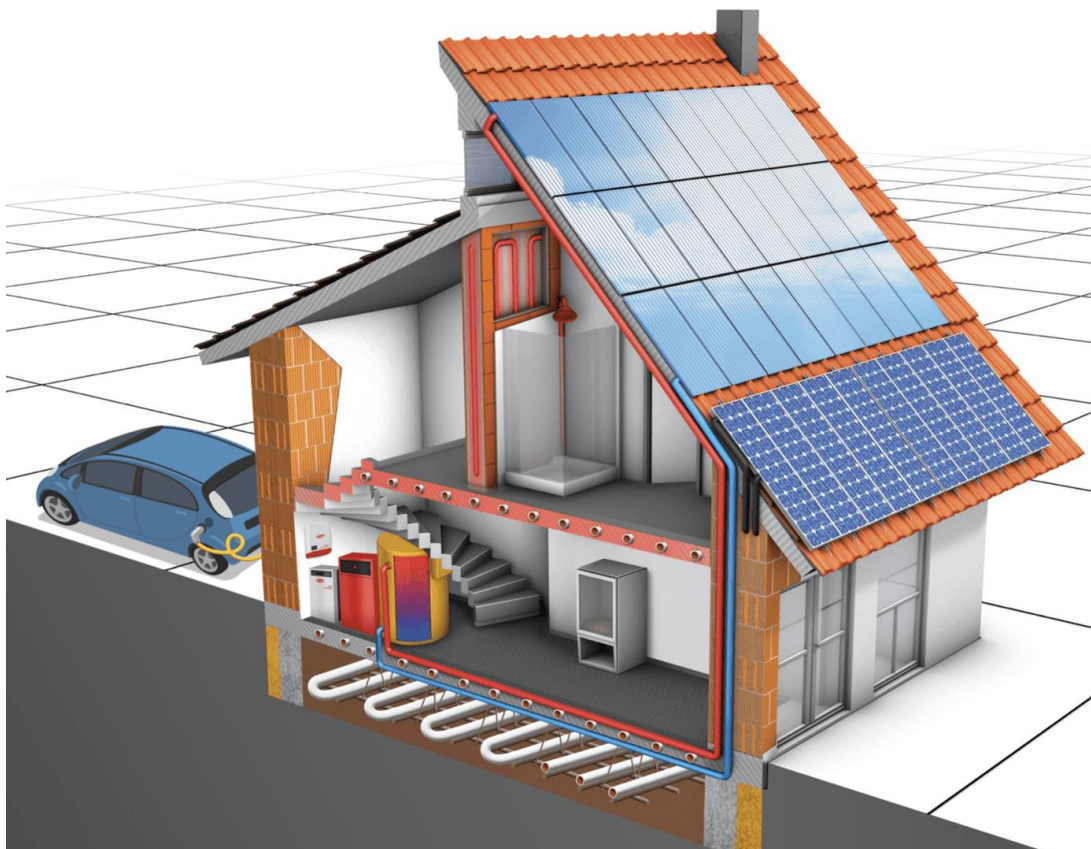


Рисунок 1.5 - Сонячна фотоелектрична та сонячна теплова система

Фотоелектрична система заснована на перетворенні сонячного світла в постійний струм та напругу і струм на клемах фотоелементів. Кількість сонячного випромінювання, що падає на поверхню фотоелектричних елементів, площа, яку займає фотоелектричний елемент, і ефективність фотоелектричного елемента визначають кількість постійної напруги і струму, які може виробляти фотоелектрична система. Фотоелектрична система може бути змонтована таким чином, що вона використовує фіксовану або систему відстеження сонячного світла в будь-який час; ця система відстеження може бути одновісною або двовісною. Однак, система відстеження має деякі переваги перед фіксованою, оскільки система відстеження може відстежувати сонячне світло в будь-який час і може витягти максимум можливого з напрямку сонячного світла, але недоліком є те, що вона вимагає деяких додаткових функцій і матеріалів, які



роблять систему більш дорогою. Низька ефективність все ще залишається головною проблемою для дослідників і виробничих компаній.

Технологія сонячної фотоелектрики відрізняється від елемента до елемента, вона в основному складається з двох категорій, перша з яких - кристалічний кремній, а друга - тонка плівка, яка, в свою чергу, вважається новою і постійно набирає популярності завдяки своїм перевагам. Кристалічний кремній є найбільш використовуваним фотоелементом на сьогоднішній день, оскільки це перша технологія фотоелементів, яка була використана раніше за інші, цей кристалічний кремній поділяється на дві групи, такі як монокристалічний і полікристалічний. З точки зору ефективності монокристалічний кремній трохи випереджає інші типи фотоелементів. На відміну від ефективності технологій, тонкоплівковий кремній має низькі втрати порівняно з іншими технологіями, такими як кристалічний кремній, як монокристалічний, так і полікристалічний, який має високі втрати, якщо температура перевищує нормальну на 25°C.

### **1.5 Система перетворення енергії вітру**

Система перетворення енергії вітру працює, коли вітер дме і б'є по лопатях ротора, це створює кінетичну енергію, потім відбувається перетворення цієї кінетичної енергії в механічну, під час цього перетворення відбуваються деякі втрати через тертя, потім лопаті ротора з'єднуються з генератором через редуктор і він працює для виробництва електроенергії. Виробництво електроенергії вітровою турбіною залежить від різних факторів, включаючи довжину лопатей, висоту вежі, лопаті ротора, типи турбін і генераторів, а також може залежати від різних інших факторів, включаючи швидкість вітру та інші екологічні проблеми.

Німеччина, за якою йде Іспанія, лідирує в Європі за встановленою вітроенергетичною потужністю, в той час як на глобальному рівні Китай і США є лідерами з точки зору високої встановленої потужності вітрових турбін.

Окрім США та Китаю, основна країна з високою встановленою вітроенергетичною потужністю знаходиться в Європі, в той час як інші регіони є дуже дефіцитними або обмеженими через різні причини, включаючи бідність, відсутність експертів у вітроенергетиці та відсутність повної інформації про вітроелектростанції. Тим не менш, у світовому виробництві вітрової енергії вітрові електростанції займають 4%, причому 9% у Європі, 4% у Північній Америці та 2% в Азії.

### **1.6 Типи та компоненти вітрових турбін**

Наразі існує лише два основних типи вітрових турбін: вітрові турбіни з вертикальною віссю та вітрові турбіни з горизонтальною віссю [11].

Вертикальна вітротурбіна сконструйована таким чином, що вал ротора закріплений вертикально, а в нижній частині турбіни знаходиться редуктор і генератор. Завдяки своїй конструкції вертикальна вітрогенераторна установка розміщується в такому положенні, що вона в будь-який момент може зіткнутися зі швидкістю вітру. Тому перевагою цього типу вітрогенератора є те, що його редуктор і генератор розташовані до землі. Їх можна легко моделювати і підтримувати, і їм не потрібно нічого, щоб повернути її обличчям до напрямку вітру, що допомагає звести до мінімуму потребу в механізмі орієнтації за вітром і датчиках .

Горизонтальні вітрогенератори мають вал ротора, який встановлюється в горизонтальному положенні, а електричний генератор і вал ротора розташовані на верхівці вежі, вона сконструйована таким чином, що може бути зафіксована в одному напрямку [12], так що у випадку зміни напрямку вітру знадобиться інший додатковий механізм, щоб мати можливість повернутися обличчям до напрямку вітру, а отже, збільшується ціна системи.

Як показано на рисунку 1.6, вітрові турбіни складаються з шести основних компонентів, і кожен з них відрізняється від іншого .

## Типи вітроелектричних установок

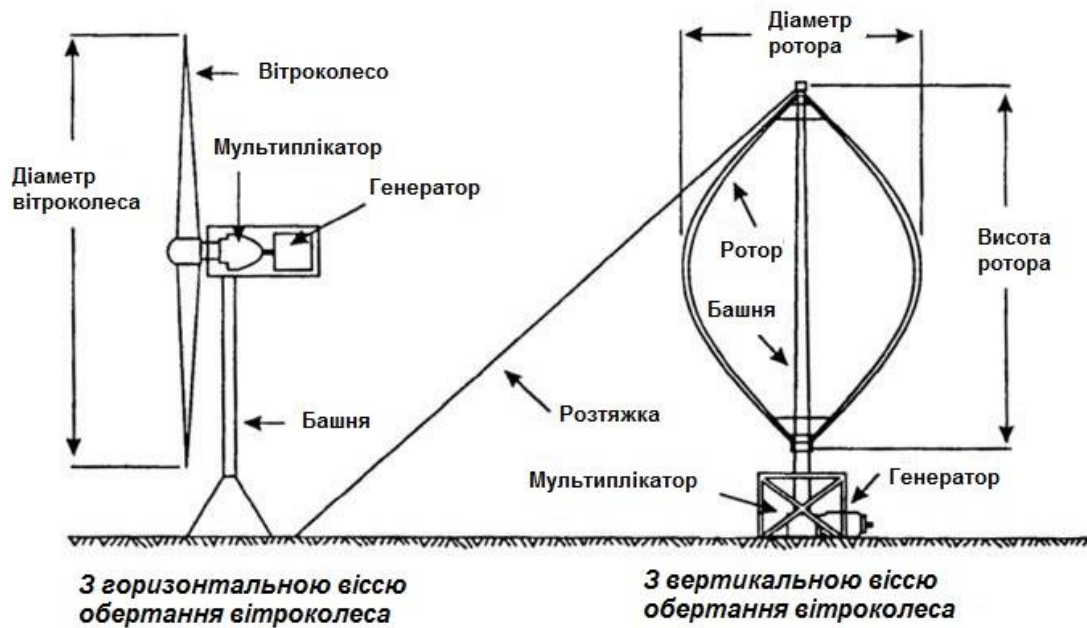


Рисунок 1.6 - Схема компонентів вітрових турбін

1. Ротор перетворює кінетичну енергію вітру на механічну за допомогою валу.
2. Редуктор з'єднує ротор і генератор, щоб регулювати обертання валу відповідно до потужності генератора.
3. Генератор перетворює механічну енергію від ротора і редуктора в електричну.
4. Система захисту і контролю для забезпечення безпеки турбін, оскільки сильний вітер може призвести до пошкодження вітрогенератора.
5. Вежа, як опора системи, оскільки ротор, редуктор і генератор висять на вежі, і використовується для збільшення висоти системи для досягнення максимальної швидкості вітру.
6. Фундамент для підтримки всієї системи, який відповідає за утримання всіх систем разом.

### **1.7 Висновки до розділу**

1. Обґрунтовано поняття мікромережа та її роль в системі електропостачання.
2. Проаналізовано типи мікромереж. Описано особливості кожної з них.
3. Проведено аналіз системи управління мікро-електромережою, або іншими словами системи енергоменеджменту.
4. Описано відновлювальні джерела енергії, які використовуються в мікромережах, серед них: фотоелектрична система перетворення сонячної енергії та система перетворення енергії вітру.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Математична модель фотоелектричного елемента

Нижче наведено схему одиночного сонячного елемента, що складається з джерела струму ( $I$ ), діодного струму ( $I_d$ ), шунтуючого опору ( $R_{sh}$ ), послідовного опору ( $R_s$ ). Система з'єднана паралельно, і кожна з них складається з послідовно з'єднаних струн. Модель сонячного елемента показана на рис. 2.1. [13]

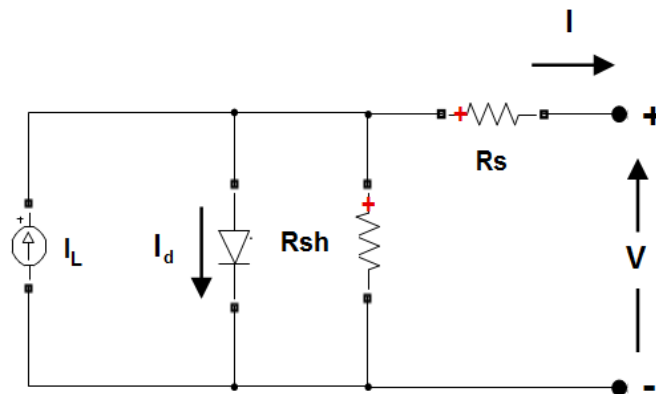


Рисунок 2.1 - Еквівалентна схема фотоелектричної моделі з одним діодом [13]

Потужність, що генерується сонячною фотоелектричною панеллю, є добутком трьох компонентів, таких як фотоелектрична ефективність  $n_{pv}$ , площа  $A_{pv}(m^2)$  і сонячне випромінювання  $I_t(Вт/м^2)$ .

$$P(t) = n_{pv} A_{pv} I_t \quad (2.1)$$

з

$$n_{pv} = n_R \left[ 1 - 0,9\beta \left( \frac{I_{pv}}{I_{pv,NT}} \right) (T_{c,NT} - T_{A,NT}) - \beta(T_A - T_R) \right] \quad (2.2)$$

де  $n_{pv}$  - ефективність фотоелектричної панелі,  
 $n_R$  - виміряна ефективність за стандартних умов випробування ( $25^\circ C$ ),  
 $T_R$  ( $^\circ C$ ) - еталонна температура елемента,  
 $\beta$  - температурний коефіцієнт для ефективності елемента

$\{0,004 - 0,005 / ^\circ C\} T_{c,NT}$  температура за умов випробування NT (45°с),

$T_{A,NT}$  - температура навколишнього середовища за умов випробування при NT (0,8 кВт·год/м) .

Тоді як струм навантаження розраховується наступним чином.

$$I_{pv} = I_L - I_d = I_L - I_o \left[ \exp \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{\alpha} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

де  $I_{pv}$  (А) - фотоелектричний струм,

$I_L$  (А) - струм навантаження,

$I_d$  (А) - струм діода,

$I_o$  (А) - струм насичення,

$U_{pv}$  (В) - напруга на клеммах (вихідна напруга),

$\alpha$  (В) – коефіцієнт теплового насичення,

$R_s$  (Ω) – послідовний опір.

При цьому

$$I_d = I_o \left[ \exp \left( \frac{V_d}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \cdot nl \cdot N_{cell} \quad (2.5)$$

де  $V_d$  (В) - напруга на діоді,

$V_T$  (В) - теплова напруга,

$nl$  - коефіцієнт ідеальності діода, близький до 1,0,

$k$  - стала Больцмана (1,3806e-23 JK-1),

$q$  - заряд електрона (1,6022e-19C),

$N_{cell}$  - кількість послідовно з'єднаних комірок в модулі,

$T$  - температура комірки (°C) .

## 2.2 Визначення потужності фотоелектричної системи

Оскільки енергія, що генерується фотоелектричною системою, не є

постійною в будь-який час доби, необхідно підібрати розмір фотоелектричної системи для задоволення попиту на енергію, рівняння (2.6) описує площу, необхідну для задоволення розрахункового попиту на енергію.

$$A_{pv} = \frac{E_l}{H_{t(av)} \cdot \eta_{pv} \cdot \eta_{batt} \cdot \eta_{inv} \cdot A_{Tcf}} \quad (2.6)$$

де  $E_l$  - це потреба в енергії, яка оцінюється за добу,

$\eta_{pv}$  - ККД фотоелектричного модуля,

$\eta_{batt}$  - ККД акумулятора,

$\eta_{inv}$  - ККД інвертора,

$A_{Tcf}$  - температурний поправочний коефіцієнт,

$H_{t(av)}$  (Вт/м<sup>2</sup>) - середнє сонячне випромінювання, зібране на досліджуваній території. Таким чином, кількість фотоелектричних модулів, необхідних для генерації необхідної кількості енергії, виражається формулою (2.7)

$$N_{pv-модулів} = \frac{P_{(t)}}{S_{пікова\ потужність}} \quad (2.7)$$

де  $S_{пікова\ потужність}$  (Вт) - номінальна максимальна потужність обраного фотоелектричного модуля.

## 2.3 Енергія вітру

Модель вітру, що використовується в цьому дослідженні, являє собою синхронний генератор на постійних магнітах (СГПМ) з напругою 230 В, потужністю 6 кВт і частотою 50 Гц. Таким чином, рівняння (2.8) виражає потужність вітрової турбіни:

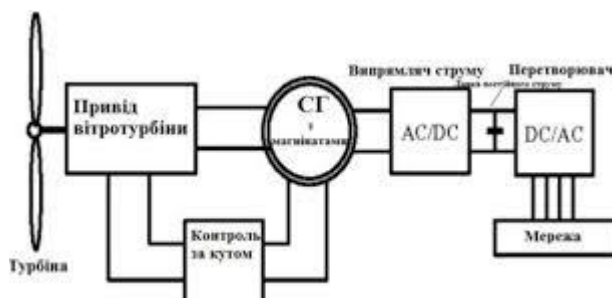


Рисунок 2.2 - Синхронний генератор на постійних магнітах (PMSG), що

приводиться в дію вітровою турбіною

Вихідна потужність вітру залежить від таких параметрів, як ефективність вітрогенератора, швидкість вітру, кут нахилу та висота вежі [14]. Таким чином, потужність, вироблена вітровою турбіною, виражається рівнянням (2.9)

$$P_w = \frac{1}{2} \eta_{wt} C_{p(\lambda, \beta)} \rho A v^3 \quad (2.8)$$

де  $v$  - швидкість вітру, що падає на лопаті турбіни,

$A$  (м<sup>2</sup>) - площа турбіни,

$C_{p(\lambda, \beta)}$  - коефіцієнт потужності вітрової турбіни, і є функцією ( $\beta$  - кута нахилу лопаті та  $\lambda$  - коефіцієнта швидкості наконечника),

$\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) - густина повітря на висоті маточини турбіни,

$\eta_{wt}$  (%) - коефіцієнт корисної дії турбіни,

$\beta$  - кут нахилу лопаті,

$\lambda$  - відношення швидкості на кінчику лопаті ротора до швидкості вітру.

Середня потужність у перерахунку на середню швидкість вітру  $V_{avg}$  (м/с) виражається як.

$$P_{wt} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \eta_{wt} \rho_{air} C_p A v_{avg}^3 \quad (2.9)$$

Швидкість вітру в центрі вежі виражається як:

$$v_{hub} = v_{ref} \left( \frac{H_{hub}}{H_{ref}} \right)^\beta \quad (2.10)$$

де  $\beta$  використовується для відображення впливу землі,

$v_{ref}$  (м/с),  $v_{hub}$  (м/с) - швидкість вітру в точці відліку та вузлі відповідно,

$H_{hub}$ (м),  $H_{ref}$  (м) - висоти, виміряні у вузлі та опорній точці, відповідно.

Коефіцієнт потужності вітрової турбіни розраховується як:

$$C_p = \frac{1}{2} \left[ (1 - \lambda)(1 - \lambda^2) \right] \quad (2.11)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт швидкості вітру.



Для максимізації ефективності ротора співвідношення повинно бути  $\lambda = \frac{1}{3}$

$$C_p(\lambda, \alpha) = \frac{P_t}{P_w} = \frac{\text{Потужність вітрової турбіни}}{\text{Потужність вітру}} \quad (2.12)$$

$$C_p(\lambda, \alpha) = 0,5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\alpha - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}}$$

де  $\alpha$  – кут повороту ротора.

При

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{\lambda + 0,08\alpha} - \frac{0,035}{\alpha^3 + 1} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

Кількість вітрогенераторів, необхідних для забезпечення певного навантаження виражається наступним рівнянням.

$$N_{\text{турбін}} = \frac{P_L \cdot SF}{P_w} \quad (2.14)$$

Де, очевидно, SF становить близько 120% і відомий як коефіцієнт запасу міцності.

## 2.4 Процес акумулювання енергії

Розподілене зберігання енергії відіграє життєво важливу роль в енергетиці завдяки своїй здатності зберігати енергію. Існує багато типів акумуляторів, і кожен з них відрізняється від іншого залежно від характеристик кожного акумулятора. Батарея може заряджатися і розряджатися в певний час, і для забезпечення безпеки батареї необхідна система управління. Щоб уникнути перезарядження або перерозрядження, які скорочують життєвий цикл батареї, необхідно встановити максимальний і мінімальний рівень заряду акумулятора. На рисунку 2.3 показана принципова схема акумулятора [13].

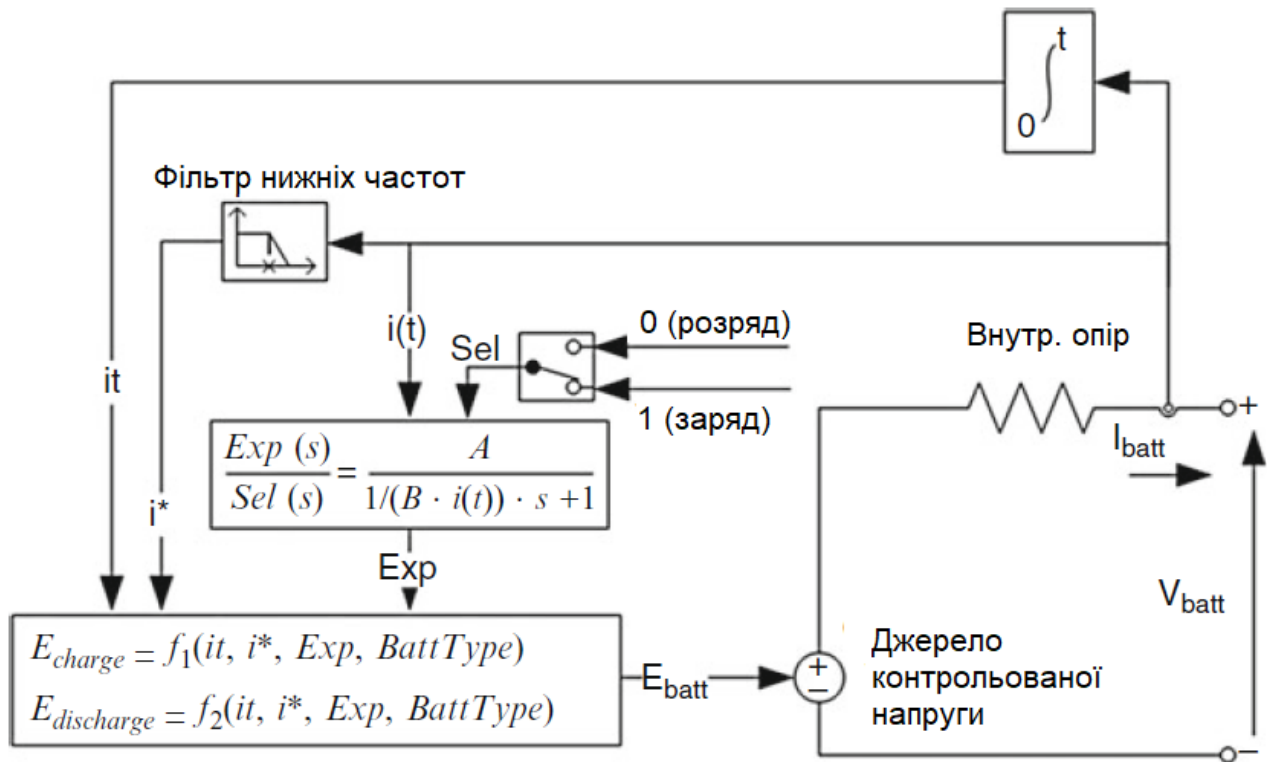


Рисунок 2.3 - Схематичне зображення моделі акумулятора

[13]

Наступне рівняння показує математичну модель для заряджання та розряджання моделі стану акумулятора.

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_{ch} P_{ch} - \eta_{disch} P_{disch} \quad (2.15)$$

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_{batt} \left( \frac{P_b(t)}{V_{bus}} \right) \Delta t \quad (2.16)$$

де SOC- поточний стан акумулятора в процесі заряджання,

$\eta_{bat}$  - ефективність акумулятора в процесі заряджання та розряджання,

$P_b(t)$  (Вт) - потужність акумулятора,

$\Delta t$  - часовий крок, який дорівнює 20 секундам,

$V_{bus}$  - напруга на шині постійного струму.

Доступна ємність акумуляторних батарей повинна знаходитись між мінімальною та максимальною ємністю і виражається рівнянням (2.17). Тому мінімальна межа розрядки батареї встановлена на рівні 40 %, а максимальний

рівень заряду батареї – 90 %, щоб продовжити життєвий цикл батареї.

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (2.17)$$

$$SOC_{\min} = (1 - DOD) SOC_{\max} \quad (2.18)$$

де DOD - глибина розряду

$SOC_{\max}$  - максимальний стан заряду акумулятора.

Необхідна ємність акумулятора в А·год визначається за наступним рівнянням.

$$M_{bat} = \frac{A_d E_L}{\eta_{bat} \eta_{inv} DOD V_s} \quad (2.19)$$

де  $A_d$  (s) - максимальний час, протягом якого батарея може працювати без підтримки з боку інших джерел,

$E_L$  (Вт·год) - енергія системи,

$V_s$  (В) с - напруга системи.

Батареї з'єднуються послідовно, щоб отримати бажану номінальну робочу напругу постійного струму, і з'єднуються паралельно, щоб отримати бажану ємність системи в А·год. Кількість батарей, необхідних для системи, розраховується за формулою:

$$N_{bat} = \frac{M_{bat}}{M_{sin}} \quad (2.20)$$

де  $M_{sin}$  - ємність батареї, яка вимірюється в А·год.

Кількість послідовно з'єднаних акумуляторів

$$(N_{bs}) = \frac{V_{bus}}{V_b} \quad (2.21)$$

де  $V_{bus}$  - напруга шини,

$V_b$  - напруга батареї

Кількість паралельно з'єднаних акумуляторів

$$(N_{bll}) = \frac{I_T}{I_{batt}} \quad (2.22)$$

де  $I_T$  - загальний струм,  
 $I_{batt}$  - струм батареї.

## 2.5 Параметри підвищувального перетворювача

Параметри підвищувального перетворювача розраховуються за допомогою наступного рівняння:

$$D = 1 - \frac{V_{in} \cdot n}{V_{out}} \quad (2.23)$$

$$d_i = I_{ripple} \cdot I_{out} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.24)$$

де  $I_{ripple}$  (A) - струм пульсацій індуктивності, який оцінюється в межах від 20 до 40% вихідного струму,

$I_{out}$  (A) - вихідний струм,

$V_{out}$  (V) - вихідна напруга,

$V_{in}$  (V) - вхідна напруга,

$n$  - коефіцієнт корисної дії,

$d_i$  - вхідний пульсаційний струм.

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad (2.25)$$

Індуктивність розраховується, як показано в рівнянні (2.24)

$$L = \frac{V_{in} \cdot (V_{out} - V_{in})}{d_i \cdot f_s \cdot V_{out}} \quad (2.26)$$

$$dv = \frac{V_{out}}{100} \quad (2.27)$$

де  $dv$  - пульсація вихідної напруги

$L$  - індуктивність,

$f_s$  - резонансна частота

$$C = \frac{I_{out} \cdot D}{f_s \cdot dv} \quad (2.26)$$

$$R = \frac{V_{out}}{I} \quad (2.27)$$

## 2.6 Висновки до розділу

1. Описано математична модель фотоелектричного елементу на основі одного діоду, яка використана у моделюванні, що представлене у третьому розділі.
2. Представлено методику розрахунку потужності фотоелектричної системи необхідної для забезпечення потреб споживачів.
3. Представлено методику розрахунку кількості вітрогенераторів, необхідних для забезпечення необхідного навантаження.
4. Наведено імітаційну модель для акумулятора електроенергії в мікро-електромережі на основі вітро-сонячної енергоустановки.
5. Наведено формули для розрахунку характеристик основних елементів схеми підвищувального перетворювача для нормалізації постійної напруги в мікро-електромережі.

## 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Методика розрахунку

Наступні моделі MATLAB представляють продуктивність фотоелектричної (ФЕ) системи, системи перетворення вітрової енергії та акумуляторної батареї для запропонованої мікромережевої системи. Моделювання виконано з використанням інструментарію sim-power та алгоритму потоку станів для моделювання та оцінки продуктивності запропонованої системи енергоменеджменту мікромережі.

#### 3.1.1 Модель фотоелектричної системи в Simulink/ MATLAB

Фотоелектрична модель, що використовується в цій роботі, - це фотоелектрична модель 230 Вт з 4 модулями, з'єднаними послідовно і з'єднаними паралельно в 4 ряди (стрінги), фотоелектричні панелі формують загальну потужність 3660 Вт, загальний струм 30,5 А і 120 В як вихідну напругу, необхідну для фотоелектричного масиву на основі входу системи DC/DC перетворювача. Характеристика обраної фотоелектричної моделі наведена в таблиці 3.1. Блок MATLAB/Simulink загальної фотоелектричної системи представлений на рисунку 3.1 З нього видно, що фотоелектрична модель підключена до підвищувального перетворювача постійного струму для підвищення напруги до потрібного рівня і керується системою відстеження точки максимальної потужності (MPPT) [15] з використанням алгоритму збурення і спостереження (P&O) для вилучення максимально можливої потужності з фотоелектричної (ФЕ) системи. Рисунок 3.2 ілюструє вольт-амперні та вольт-амперні характеристики [16] криві V-I і P-V з моделі фотоелектричної системи в MATLAB при  $1000 \text{ Вт/м}^2$  за номінальної стандартної температури  $25^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 3. 1 - Параметри фотоелектричних систем в MATLAB

|                                                      |         |
|------------------------------------------------------|---------|
| Модуль: 1STH-230-P                                   |         |
| Мінімальна потужність (Вт)                           | 228.735 |
| Напруга холостого ходу $V_{oc}$ (v)                  | 37.1    |
| Напруга в точці максимальної потужності $V_{mp}$ (V) | 29.9    |
| Температурний коефіцієнт $V_{oc}$                    | -0.361  |
| Кількість елементів на модуль ( $N_{cell}$ )         | 60      |
| Струм короткого замикання $I_{sc}$ (A)               | 8.18    |
| Струм в точці максимальної потужності $I_{mp}$ (A)   | 7.65    |
| Температурний коефіцієнт $I_{sc}$                    | 0.102   |

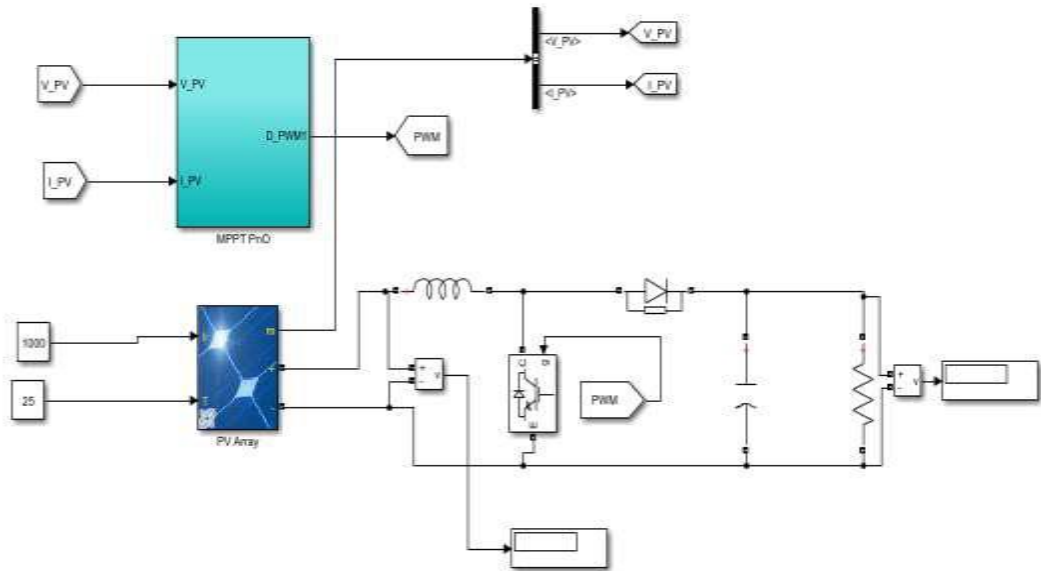


Рисунок 3.1 - Блок-схема фотоелектричної системи, підключеної до підвищувального перетворювача

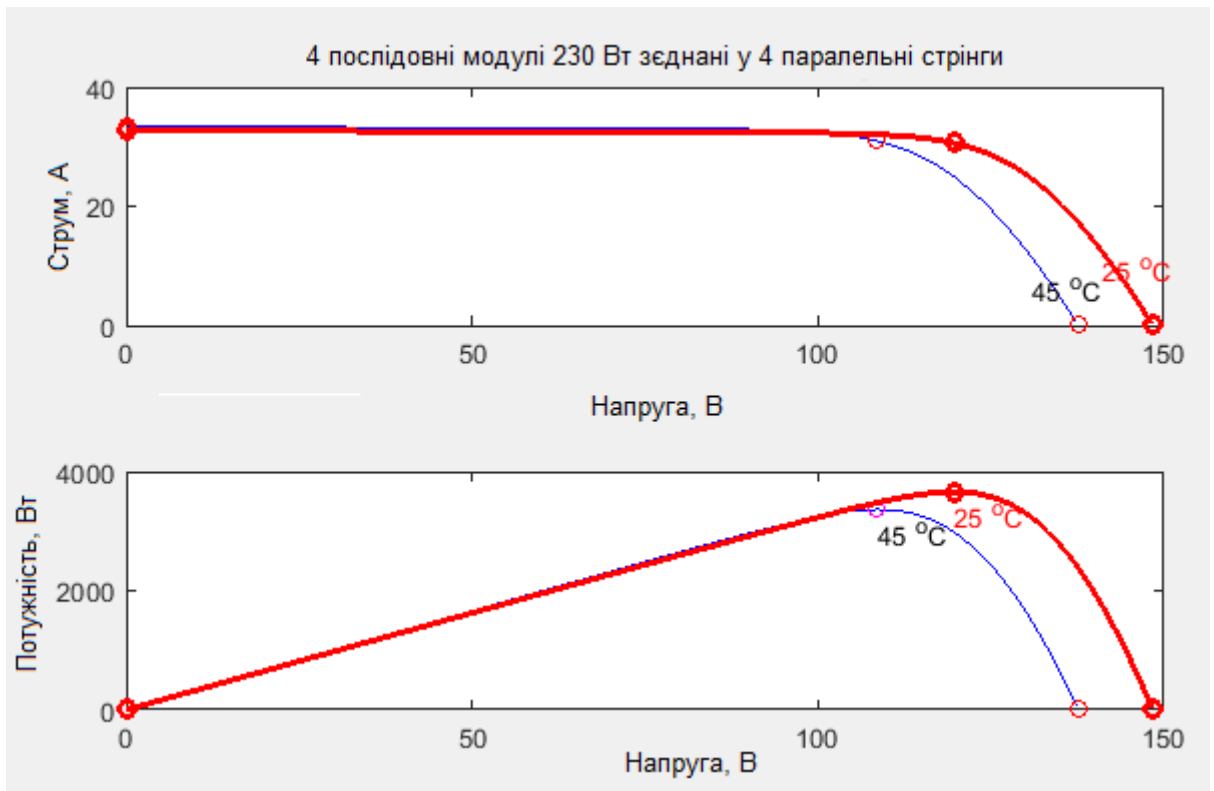


Рисунок 3.2 - V-I та P-V характеристики фотоелектричної батареї при потужності 1000 Вт/м<sup>2</sup>

### 3.1.2 Розрахунок характеристик фотоелектричної системи

Кількість панелей, необхідних для послідовного з'єднання

$$(V_{ps}) = \frac{120}{29,9} \cong 4$$

$$V_{new} = 4 \cdot 29,9 = 120V_{dc}$$

Струм розраховується за наступною формулою,

$$P = VI$$

Загальний струм розраховується наступним чином

$$I_T = \frac{P}{V} = \frac{3660}{120} = 30,5 \text{ A}$$

Кількість паралельно з'єднаних панелей

$$(N_{pp}) = \frac{I_T}{I_{mp}} = \frac{30,5}{7,65} = 3,9 \cong 4$$



$$\text{Фактична потужність} = (N_{pp} \cdot I_{mp} \cdot N_{ps} \cdot V_{mp}) = (4 \cdot 7,65 \cdot 4 \cdot 29,9) = 3659,7 \text{ Вт}$$

Отже, при підключенні 16 фотоелектричних панелей, 4 послідовно, а інші 4 паралельно, загальна потужність від фотоелектричних ( $P_V$ ) панелей виражається кількістю всіх панелей ( $N_p$ ), помноженою на потужність кожної панелі ( $P_p$ )

$$P = 16 \cdot 228,735 = 3659,76 \text{ Вт}$$

### 3.1.3 Система відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Алгоритм MPPT використовується для вилучення максимальної вихідної потужності з фотоелектричної системи, існує декілька методів MPPT для вилучення максимальної потужності з фотоелектричної системи, такі як нечітка логіка, збурення та спостереження (P&O), інкрементна провідність, дробова напруга короткого замикання, нейронна мережа. В огляді літератури представлено декілька методів, що стосуються алгоритму MPPT. Тому для цього дослідження було обрано алгоритм MPPT - алгоритм «збурення та спостереження» (P&O) через його ефективність та простоту застосування. На рисунку 3.3 показано MATLAB-блок алгоритму P&O. На рисунку 3.4 показано блок-схему алгоритму P&O.

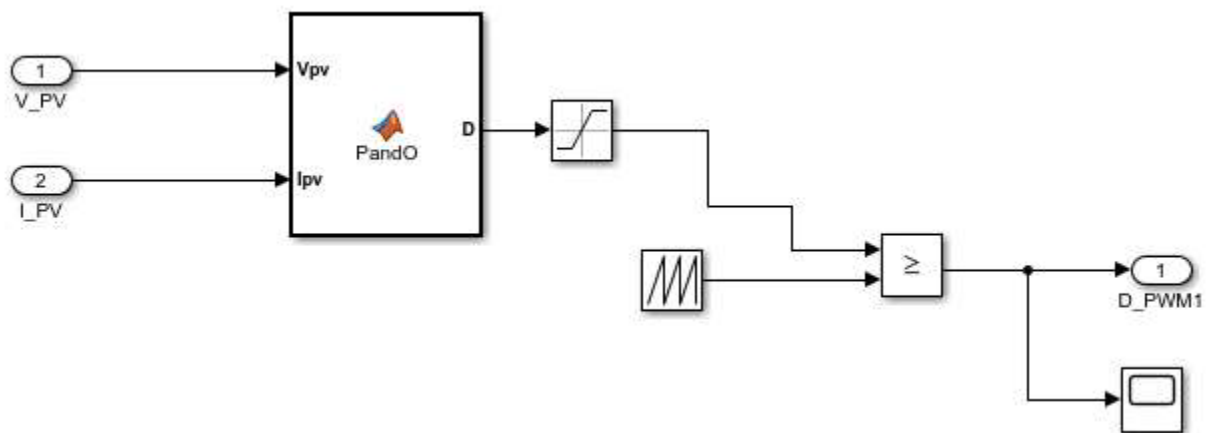


Рисунок 3.3 - Функція MATLAB для реалізації точки максимальної потужності

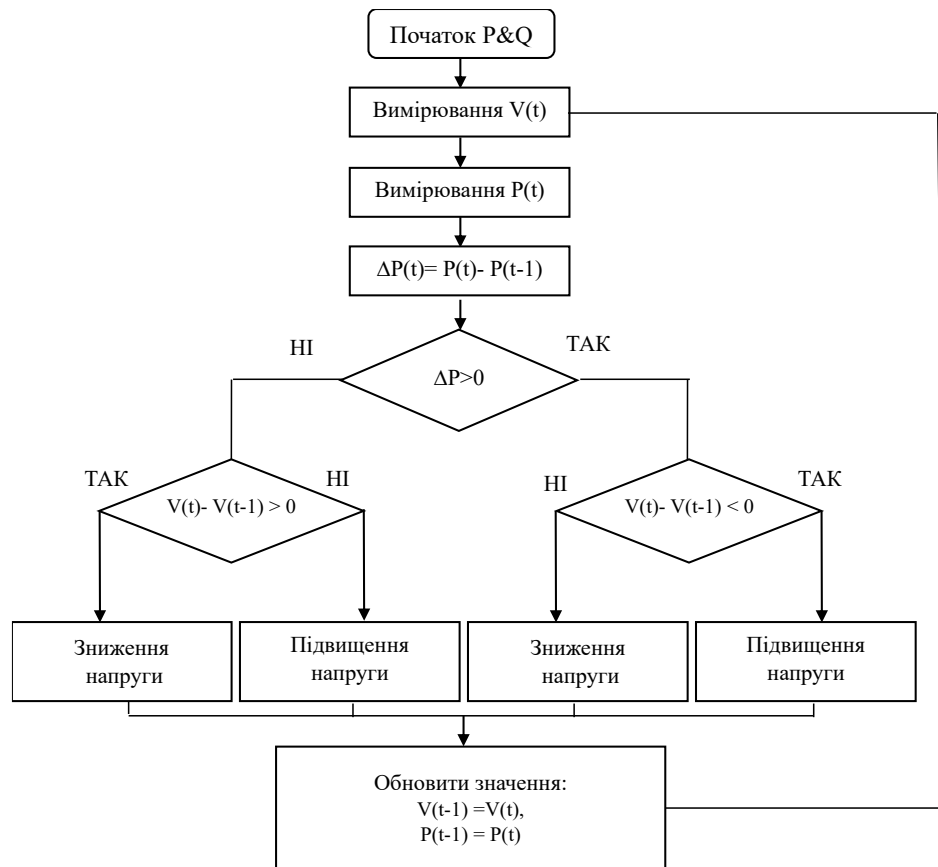


Рисунок 3.4 - Блок-схема алгоритму Р&amp;О

### 3.1.4 Модель підвищувального перетворювача для фотоелектричних модулів

За допомогою MATLAB/Simulink змодельовано підвищувальний перетворювач, який підвищує напругу фотоелектричних перетворювачів 120 В до 230 В за допомогою системи МРРТ. Були проведені розрахунки для визначення ємності, індуктивності та опору навантаження, щоб отримати бажану вихідну напругу від перетворювача. Схема підвищувального перетворювача з усіма параметрами представлена на рис. 3.5 та табл. 3.2, для керування робочим циклом використовувався МРРТ-контролер, щоб отримати потрібну вихідну напругу. З розрахунків  $L=2,3 \cdot 10^{-4}$  Н,  $C=1,8 \cdot 10^{-4}$  Ф, і  $R=14,5$  Ом. Параметри підвищувального перетворювача були розраховані за формулою, наведеною в рівняннях 2.21 - 2.27. Тому на рисунку 3.6 показано вихідну потужність перетворювача, а на рисунках 3.7 і 3.8 - результати моделювання перетворювача, де вхідний струм і напруга майже близькі до розрахункових

значень, а вихідна напруга і струм перетворювача збігаються з розрахунковими значеннями.

$$D = 1 - \frac{v_{in} \cdot 0,9}{v_{out}} = 1 - \frac{120 \cdot 0,9}{230} = 0,53$$

Час вибірки  $T_s = 1/20000$

$$I_{out} = \frac{P}{V_{out}} = \frac{3660}{230} = 15,9A$$

$I_{ripple}$  оцінюється в межах від 20% до 40% від вихідного струму

$$d_i = I_{ripple} \cdot I_{out} \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} = 0,4 \cdot 15,9 \cdot \frac{230}{120} \cong 12,2A$$

$$L = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{d_i \cdot f_s \cdot V_{out}} = \frac{120(230 - 120)}{12,2 \cdot 20000 \cdot 230} = \frac{13200}{56120000} = 2,310^{-4}H$$

де  $\Delta V$  становить 1 відсоток від  $V$

$$\Delta V = 1 \cdot \frac{230}{100} = 2,3B$$

$$R = \frac{V_{out}}{I} = \frac{230}{15,9} = 14,5\Omega$$

$$C = \frac{I \cdot D}{f_s \cdot \Delta V} = \frac{15,9 \cdot 0,53}{20000 \cdot 2,3} = \frac{8,4}{46000} = 1,810^{-4}F$$

Таблиця 3.2 - Вхідні параметри бустерного (підвищувального) перетворювача

| Вхідний параметр                      | Значення            |
|---------------------------------------|---------------------|
| Номінальна потужність (Вт)            | 3660                |
| Індуктивність (H)                     | $2,3 \cdot 10^{-4}$ |
| Ємність конденсатора (F)              | $1,8 \cdot 10^{-4}$ |
| Опір навантаження ( $\Omega$ )        | 14,5                |
| Вхідна напруга (В)                    | 120                 |
| Вихідна напруга (В)                   | 230                 |
| Коефіцієнт корисної дії перетворювача | 0,9                 |

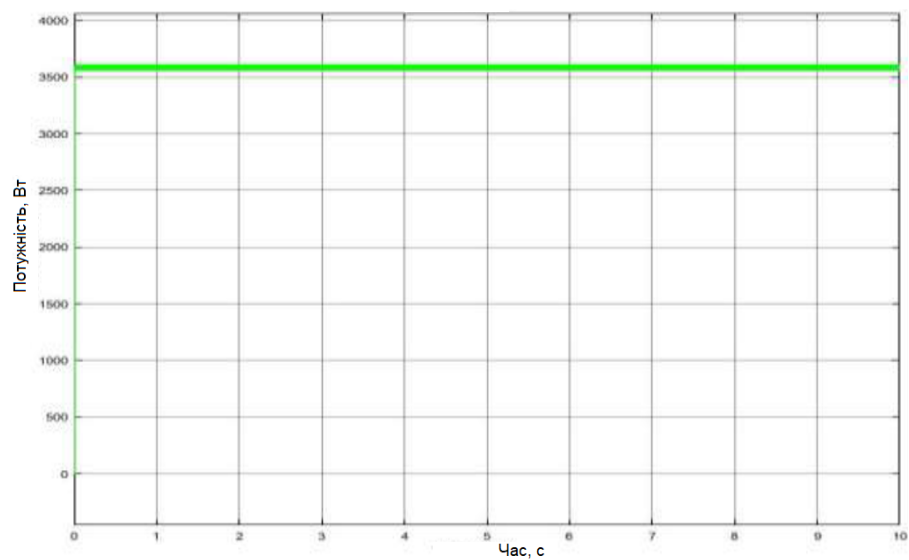


Рисунок 3.6 - Вихідна потужність перетворювача

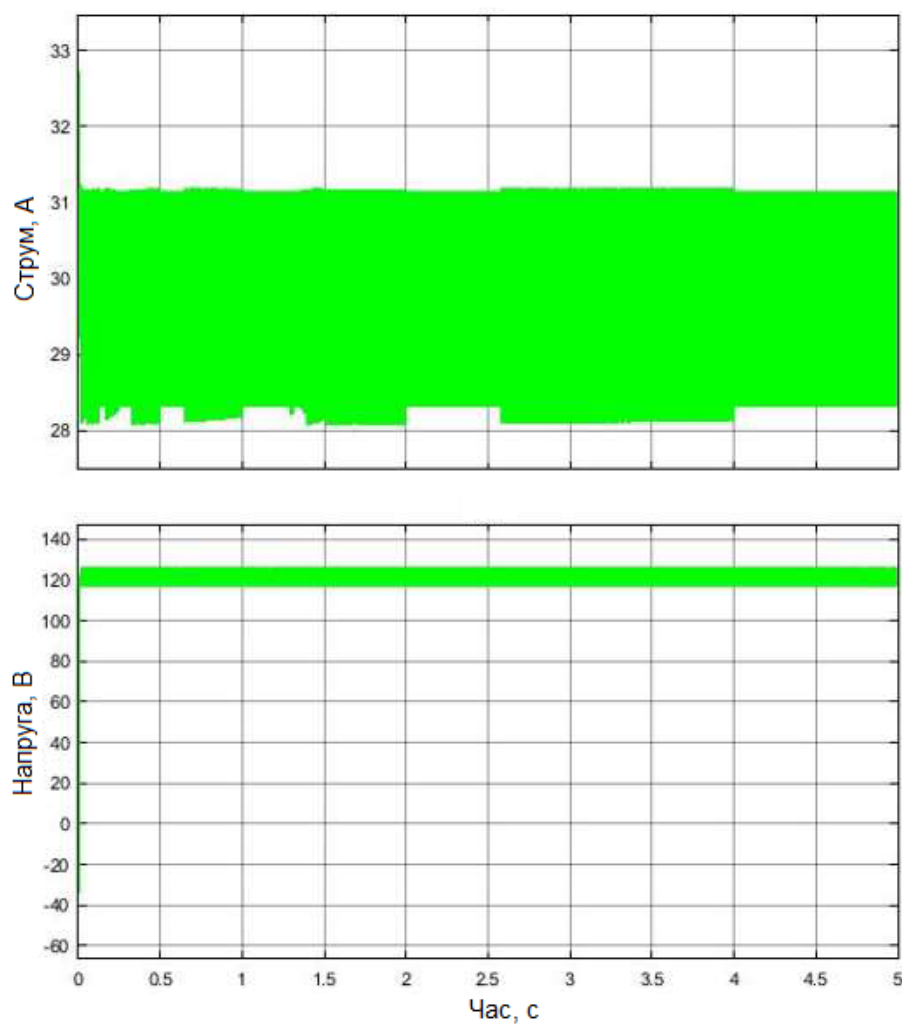


Рисунок 3.7 - Вхідна напруга та струм перетворювача

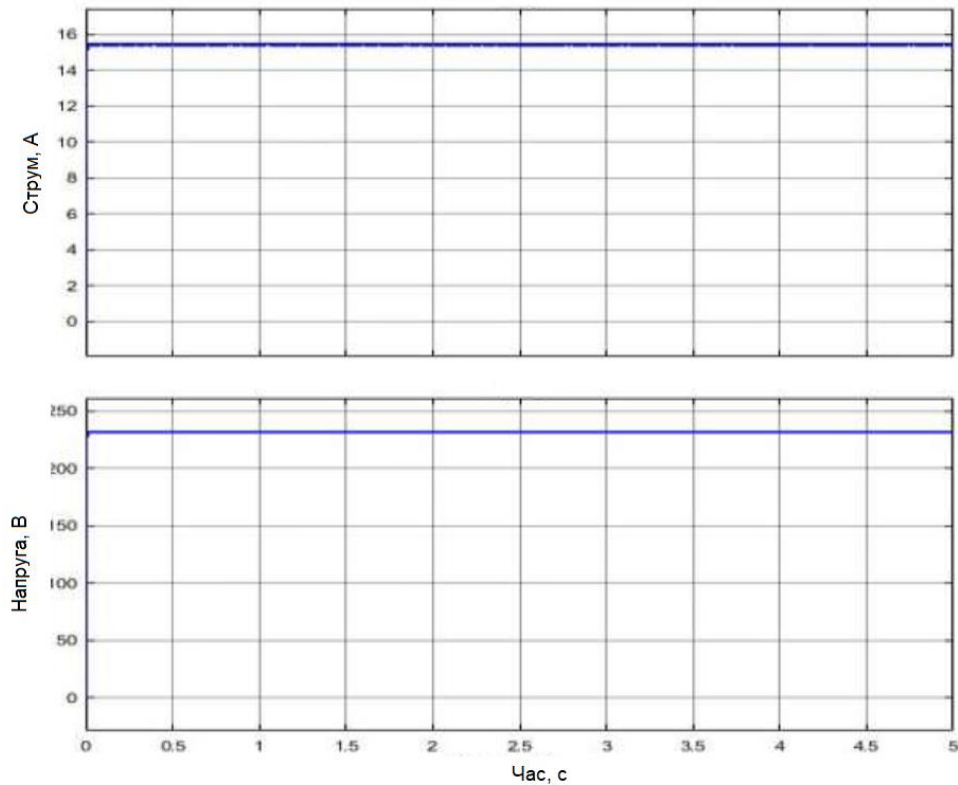


Рисунок 3.8 - Вихідна напруга та струм перетворювача

### 3.1.5 Потужність вітрової турбіни

Модель вітрової турбіни, що розглядається в даній роботі, являє собою вітрову турбіну, підключену безпосередньо до ротора синхронного генератора з постійними магнітами (PMSG). Причиною вибору синхронного генератора з постійними магнітами є той факт, що вони дешевші у виробництві, оскільки їх двигун не потребує обмотки збудження, що, в свою чергу, знижує ціну. PMSG обертається з фіксованою швидкістю. На рис. 3.9 показана модель вітрогенератора в Simulink/MATLAB. У таблиці 3.3 наведені параметри BEU PMSG. Характеристики вітрової турбіни розроблені за допомогою MATLAB, як показано на рис. 3.10.

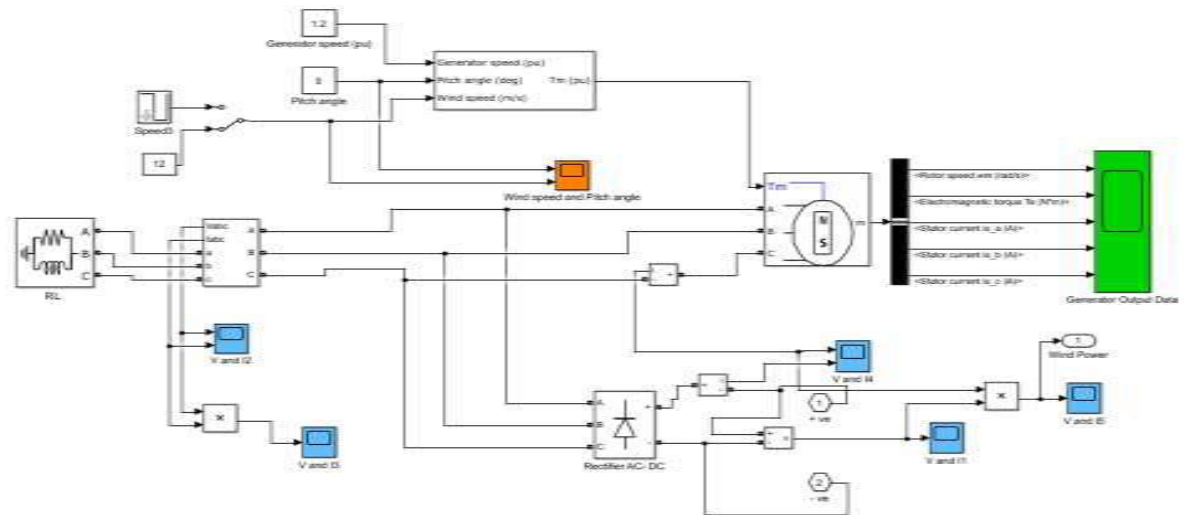


Рисунок 3.9 - Модель вітру в Simulink/MATLAB

Таблиця 3.3 - Вхідні параметри моделі (PMSG)

| Параметри вітрової турбіни                   | Значення |
|----------------------------------------------|----------|
| Номінальна вихідна потужність (кВт)          | 6        |
| Швидкість вмикання (м/с)                     | 2,5      |
| Номінальна швидкість (м/с)                   | 12       |
| Швидкість відключення (м/с)                  | 13       |
| Діаметр ротора (м)                           | 2,5      |
| Густина повітря (кг/м <sup>3</sup> )         | 1,225    |
| Загальні капітальні витрати (R)              | 3200     |
| Річні витрати на технічне обслуговування (R) | 100      |

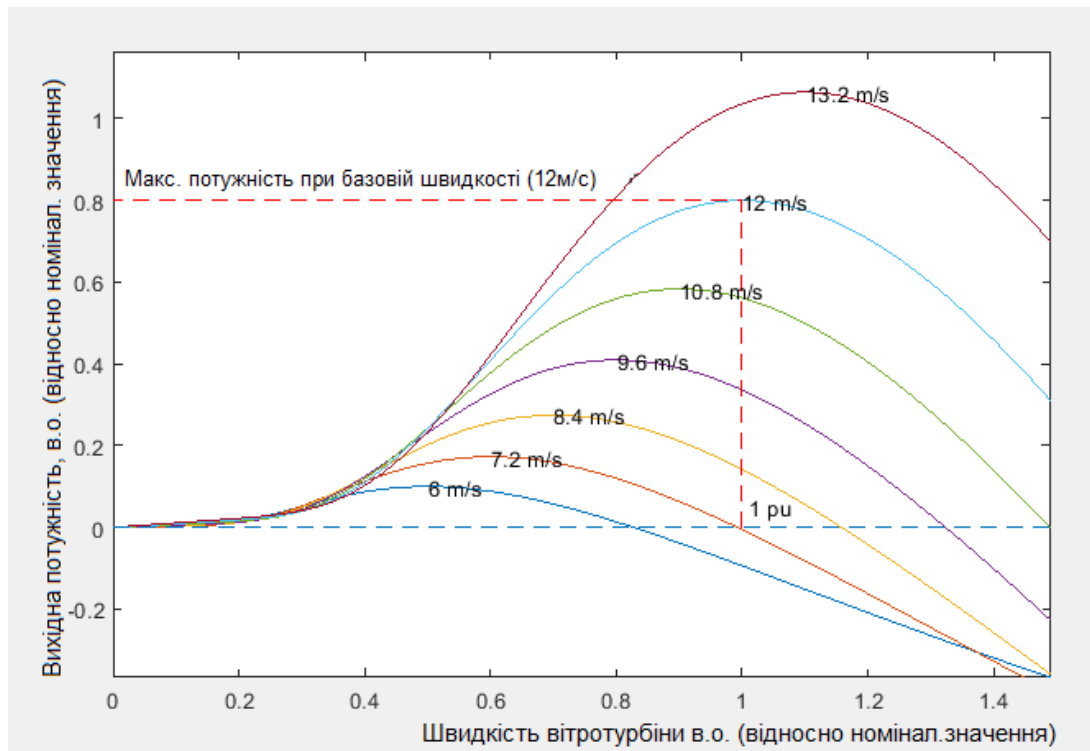


Рисунок 3.10 - Характеристичні криві вітрової турбіни для різних швидкостей вітру

### 3.1.6 Акумуляторна батарея

Акумуляторна батарея використовується для зберігання енергії та її використання у разі нестачі від основного джерела. Існує багато типів акумуляторів з різними характеристиками, як описано в попередніх роздах. Батарею можна заряджати і розряджати залежно від наявності електроенергії. Однак у цьому проекті для мікромережі використовується AGM акумулятор через його ефективність і довговічність як з точки зору стійкості до змін навантаження, так і з точки зору процесу заряджання і розряджання. Батарея підключена до шини постійного струму через перемикачі, щоб мати можливість заряджати і розряджати, перемикачі контролюються алгоритмом потоку станів, щоб вирішити, чи повинна батарея почати заряджатися або розряджатися, або не робити ні того, ні іншого, шляхом замикання і розмикання перемикачів. Було обрано акумуляторну батарею на 230 В і 40 А·год загальною номінальною ємністю 9200 Вт·год, вибір ємності батареї ґрунтувався на вартості, оскільки

батарея може бути використана лише як резервна у випадку, якщо відновлюваної енергії буде недостатньо, отже, цей розмір ідеально підходить з точки зору економії коштів, оскільки не є надто малим за ємністю і не є надто дорогим для проекрованої системи. Однак, для збільшення життєвого циклу акумуляторної системи та безпечної експлуатації, мінімальна та максимальна швидкість розряду та заряду акумулятора встановлена на рівні 40% як мінімум та 90% як максимум. На рис. 3.11 показано модель акумулятора в Simulink, а на рис. 3.12 - криві розряду акумулятора, розроблені в MATLAB. У таблиці 3.4 наведено вхідні параметри обраної моделі акумулятора.

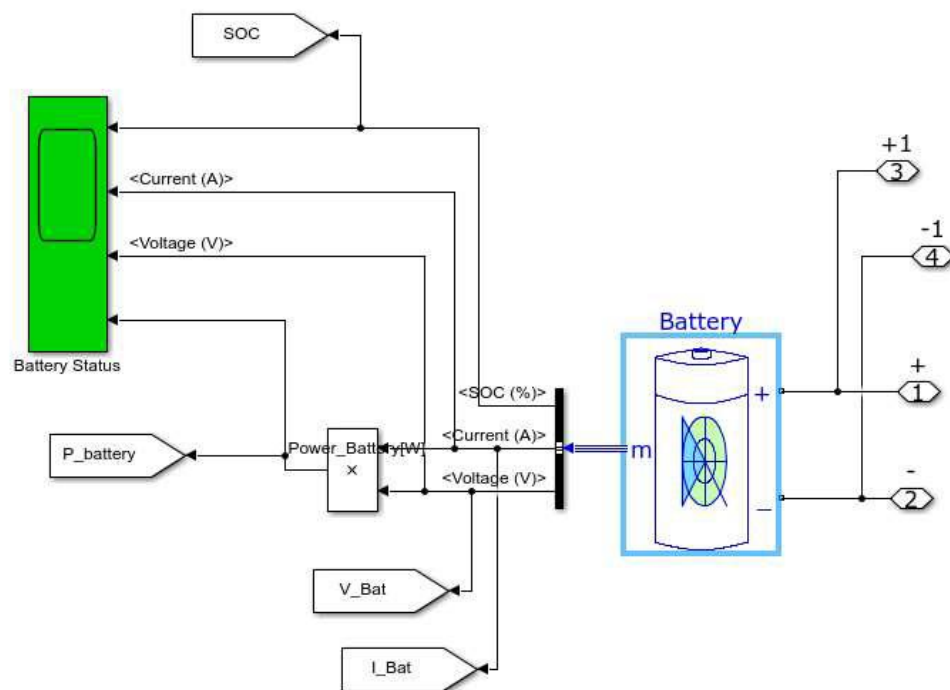


Рисунок 3.11 - Модель акумуляторної батареї в Simulink/MATLAB

На рис. 3.12 представлені криві розряду батареї, побудовані MATLAB відповідно до вхідних параметрів з таблиці 3.4. Зауважте, що швидкість розряду батареї залежить від величини прикладеного навантаження, якщо навантаження велике, батарея може розряджатися швидше, ніж при звичайному навантаженні.



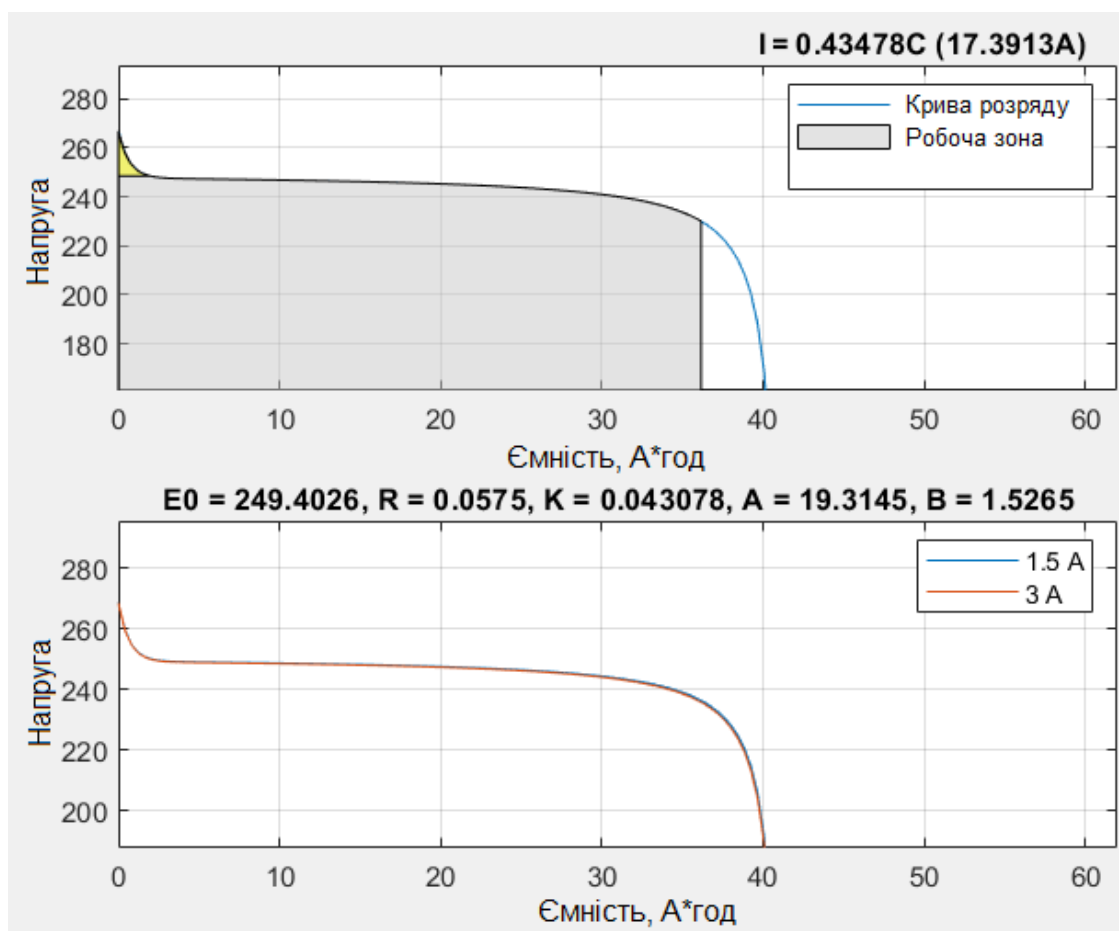


Рисунок 3.12 - Характеристика кривих розряду акумулятора при номінальному струмі

Таблиця 3.4 – Характеристики акумуляторної батареї

| Вхідний параметр                                    | Значення     |
|-----------------------------------------------------|--------------|
| Номінальна напруга (В)                              | 230          |
| Номінальна ємність (Ah)                             | 40           |
| Максимальна ємність (Ah)                            | 40           |
| Повністю заряджена напруга (В)                      | 267          |
| Номінальний розрядний струм (А)                     | 17.3913      |
| Внутрішній опір (Ом)                                | 0.0575       |
| Ємність (А·год) при номінальній напрузі             | 36.1739      |
| Експоненціальна зона [напруга (В), ємність (А·год)] | [48,48 1,96] |
| Час реакції на напругу акумулятора (сек)            | 0.1          |

Представлена крива розряду батареї з номінальною напругою 230 В, ємністю 40 А·год, яка складається з трьох станів, таких як експоненціальне падіння від повного заряду, коли батарея починає розряджатися, лінійна ділянка, коли батарея зазвичай працює при нормальній напрузі, і нелінійна ділянка, коли батарея близька до стану остаточного розряду, отже, величина струму, яку батарея може видавати, залишається менш постійною протягом досить тривалого часу, а потім швидко падає, коли досягається межа її ємності.

### **3.2 Алгоритм управління енергоспоживанням**

Система управління енергоспоживанням підвищує надійність мікромережі, на яку може впливати нестабільність відновлюваних джерел енергії, що може призвести до невідповідності між попитом та пропозицією [17,14,18]. Для забезпечення справедливого розподілу енергії між різними джерелами можна використовувати багато типів систем енергоменеджменту, таких як нечітка логіка, автомат і ПІД-регулятор [19,20]. Система управління за допомогою автомата була обрана через її ефективність, де реалізовано дев'ять станів для повного контролю потоку енергії між джерелами та навантаженням.

Енергія, що генерується фотоелектричною та вітровою турбінами, буде використовуватися для живлення побутового навантаження (змінного та постійного струму) в ізольованій мікромережі. Житловий будинок не має інших джерел, окрім цієї відновлюваної енергії, а навантаження постійного струму (навантаження 1) складається з трьох навантажень, які вмикаються і вимикаються вимикачами в різний час і з'єднані паралельно, а навантаження змінного струму (навантаження 2) складається з двох навантажень, з'єднаних паралельно і керованих вимикачем, які вмикаються і вимикаються в різний час. Таким чином, у випадку, якщо потужність від систем відновлюваної енергетики перевищує потребу побутового навантаження, надлишок буде використовуватися для зарядки акумулятора, якщо рівень заряду акумулятора стане більше 90 %, то акумулятор автоматично відключиться і припинить

заряджатися від систем відновлюваної енергетики. Акумуляторна батарея буде використовуватися тільки в разі дефіциту електроенергії (фотоелектричні та вітрові турбіни). Однак, якщо потужність, вироблена з відновлюваних джерел (фотоелектричні модулі та вітрогенератори), перевищує потребу навантаження, а стан заряду акумулятора знаходиться на найвищому рівні (90 %), буде підключено дамп-навантаження для накопичення надлишкової потужності, коли акумулятор буде заповнений.

У випадку, якщо згенерована відновлювана енергія є меншою за необхідну потужність навантаження, система управління енергією автомата перевірить стан заряду акумулятора. Якщо стан заряду батареї знаходиться на нормальному або вищому рівні зарядженої ємності, батарея автоматично підключається до навантаження, щоб покрити дефіцит в потребі навантаження. Якщо рівень заряду батареї нижче мінімального, батарея буде відключена, щоб запобігти її пошкодженню.

### 3.3 Умови роботи системи управління енергією

Для роботи запропонованої системи енергоменеджменту були розроблені та впроваджені в блок-схему автомата наступні умови, де  $P_{ren}$  - відновлювана потужність,  $P_{Load}$  - силове навантаження,  $SOC$  - стан заряду акумулятора,  $D_{Load}$  - навантаження скидання.

Якщо  $P_{ren} \geq P_{Load}$  &  $SOC < 40\%$

Charging = 1; Discharging = 0; Load10n = 1; Load20n = 1; D<sub>Load</sub> = 0.

Електроенергія від відновлюваних джерел енергії (сонце та вітер) в цьому випадку буде використовуватися для живлення навантаження, а надлишок буде використовуватися для зарядки акумулятора, у випадку, якщо стан заряду акумулятора досягне свого максимуму (90 %), алгоритм відключить акумулятор для запобігання перезарядки, таким чином, термін служби акумуляторної батареї буде збільшено.

Якщо  $P_{ren} \geq P_{Load}$  &  $SOC > 40\%$  : &  $SOC < 90\%$

Charging = 1; Discharging = 0; Load10n = 1; Load20n = 1; D<sub>Load</sub> = 0.

У цьому випадку, оскільки стан батареї знаходиться в нормальному стані, коли вона може заряджатися або розряджатися в будь-який час, надлишкова енергія від ВДЕ буде використана для заряджання батареї. Навантаження скидання не потрібно буде підключати, оскільки енергія буде використовуватися як для живлення навантаження, так і для зарядки акумулятора в разі надлишку потужності.

Якщо  $P_{ren} \geq P_{Load}$  &  $SOC > 90\%$

Charging = 0; Discharging = 0; Load10n = 1; Load20n = 1; D<sub>Load</sub> = 1.

У цьому випадку, оскільки стан заряду акумулятора знаходиться на найвищому рівні заряду, надлишкова потужність від відновлюваних джерел енергії буде підключена до скидного навантаження, щоб уникнути перевантаження.

Якщо  $P_{ren} < P_{Load}$  &  $40 < SOC < 90\%$

Charging=0; Discharging=1; Load10n=1; Load20n=1; D<sub>Load</sub>=0.

У випадку, якщо відновлювана енергія не в змозі задовольнити потреби навантаження, алгоритм перевірить стан заряду акумулятора. Якщо рівень заряду батареї знаходиться на нормальному рівні між ( $40\% < SOC < 90\%$ ), енергія буде взята з батареї, щоб покрити дефіцит навантаження. Навантаження буде підключено, але навантаження скидання не буде підключено.

Якщо  $P_{ren} < P_{Load}$  &  $SOC > 90\%$

Charging=0; Discharging=1; Load 10n=1; Load 20n=1; D<sub>Load</sub>=0.

У випадку, якщо відновлюваної енергії недостатньо для забезпечення навантаження, алгоритм перевірить стан заряду акумулятора, і якщо стан заряду акумулятора буде на найвищому рівні (90%), дефіцит навантаження

буде компенсовано за рахунок акумулятора.

Якщо  $P_{ren} < P_{Load}$  &  $SOC < 40\%$

Перша умова

$$P_{ren} \geq P_{L1}$$

Charge = 1; Discharge = 0; Load1On=1; Load2On= 0; D<sub>Load</sub> = 0.

Друга умова

$$P_{ren} \geq P_{L2}$$

Charge = 1; Discharge = 0; Load1On = 0; Load2On = 1; D<sub>Load</sub> = 0.

Інакше

Charge = 1; Discharge = 0; Load1On=0; Load2On= 0; D<sub>Load</sub> = 0.

У випадку, якщо потужність від ВДЕ не в змозі забезпечити навантаження, а SOC акумулятора менше мінімального, алгоритм перевірить доступну потужність від ВДЕ і порівняє її з потужністю першого навантаження, якщо потужність ВДЕ дорівнює або перевищує потужність першого навантаження, алгоритм відключить друге навантаження, якщо потужність відновлюваної енергії менша за потужність першого навантаження, алгоритм перевірить друге навантаження, якщо виявиться, що потужність відновлюваної енергії більша або дорівнює потужності другого навантаження, то перше навантаження буде відключено і підключено друге навантаження та акумулятор, а якщо потужність відновлюваної енергії менша за потужність другого навантаження, то обидва навантаження будуть відключені.

На рис. 3.13 представлено підсистему блоку управління в Simulink, система призначена для моніторингу та управління потоком енергії між цими переривчастими джерелами енергії і, як видно, система має три входи, такі як Pload, Відновлювана енергія та Стан заряду акумулятора, в той час як вихід складається з п'яти компонентів, таких як навантаження 1, навантаження 2, скидання навантаження, зарядка і розрядка. Це означає, що система контролює вихід на основі порівняння вхідних даних, щоб вирішити, який вихід буде для

наступного рішення.

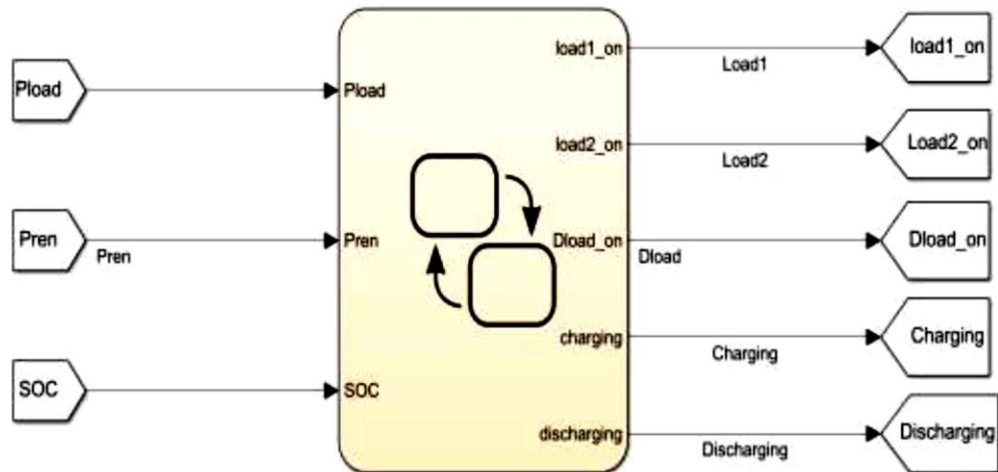


Рисунок 3.13 - Підсистема блоку управління у Simulink

На рисунку 3.14 показано алгоритм роботи системи управління.

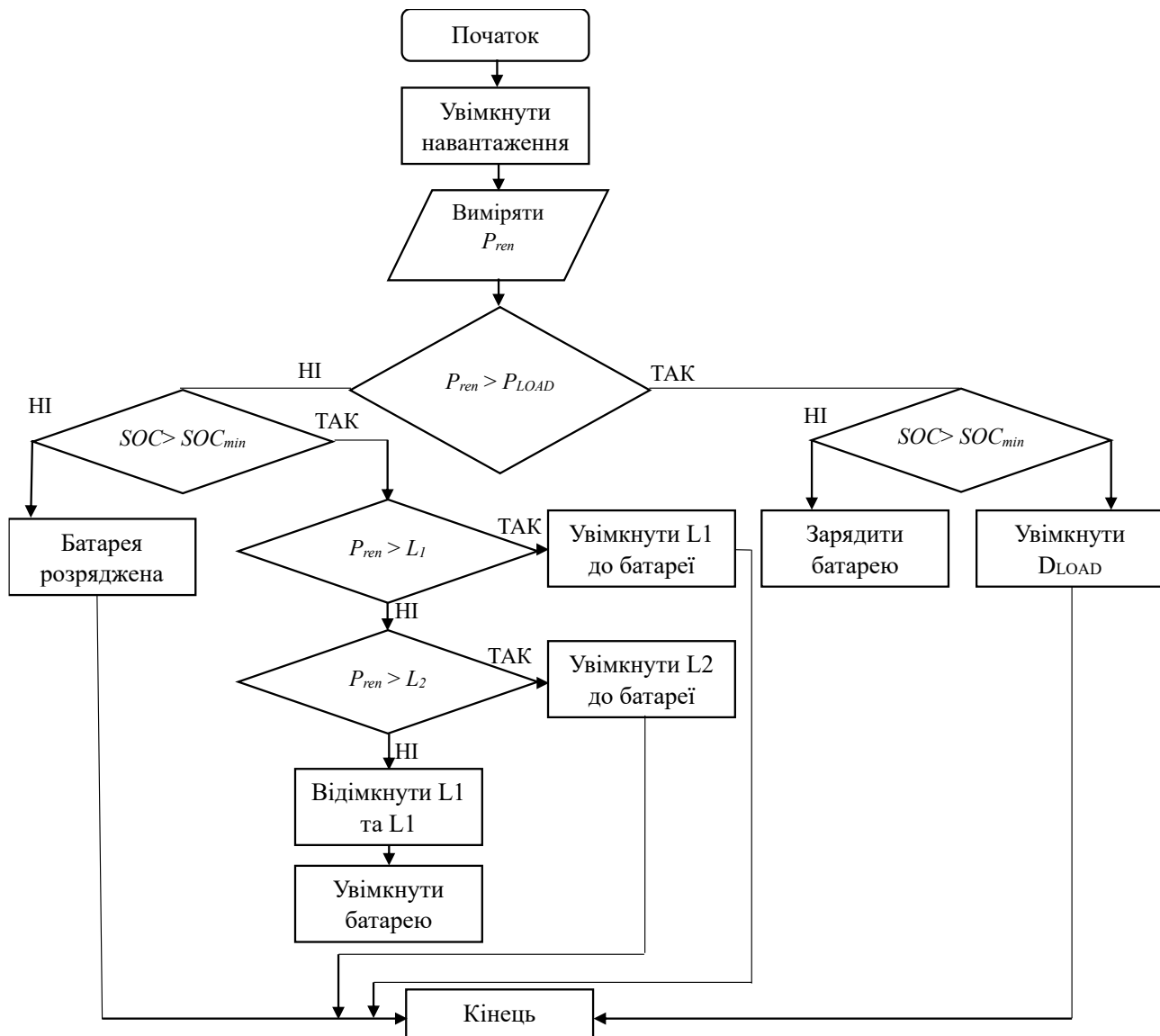


Рисунок 3.14 – Алгоритм роботи системи управління енергоспоживанням

### 3.4 Результати моделювання

Тематичне дослідження запропонованої мікромережі побудовано за допомогою MATLAB/Simulink, як показано на рисунку 3.15, а на рисунку 3.16 показано фотоелектричні модулі, підключені до підвищувального перетворювача для узгодження напруги вітрової системи, і вітрову турбіну, підключену безпосередньо до випрямляча для перетворення її змінного струму в постійний для узгодження з типами напруги фотоелектричних модулів. Результати моделювання в Simulink для різних сценаріїв представлені на рисунках 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 та 3.22. Система управління енергоспоживанням розроблена з використанням алгоритму автомата для виконання розподілу навантаження між різними джерелами відновлюваної енергії (фотоелектричними модулями та вітротурбіною), які об'єднані як джерело постійного струму і живлять як навантаження, так і систему акумуляторних батарей. Вітрова турбіна потужністю 6 кВт з напругою 230 В пов'язана з фотоелектричною системою потужністю 3,6 кВт з напругою 120 В, підключеною до підвищувального перетворювача постійного струму, що приводиться в дію MPPT і змінює її на напругу 230 В постійного струму, як показано на рисунку 3.16. Модель батареї налаштована на 230 В, а початковий рівень заряду становить 69% для першого сценарію, 49% для другого сценарію і 89% для третього сценарію, підключених до навантаження як постійного, так і змінного струму одночасно. Навантаження складається з навантаження постійного струму (навантаження 1) та навантаження змінного струму (навантаження 2), які керуються перемикачами, щоб їх можна було вмикати та вимикати в різний час. Таким чином, перше навантаження - це навантаження постійного струму, що складається з трьох різних навантажень, керованих перемикачами, які можна вмикати і вимикати в різний час, і з'єднаних паралельно із загальною споживаною потужністю 4 кВт, тоді як друге навантаження - це навантаження змінного струму, що складається з двох навантажень, керованих перемикачами, які можна вмикати і вимикати в різний





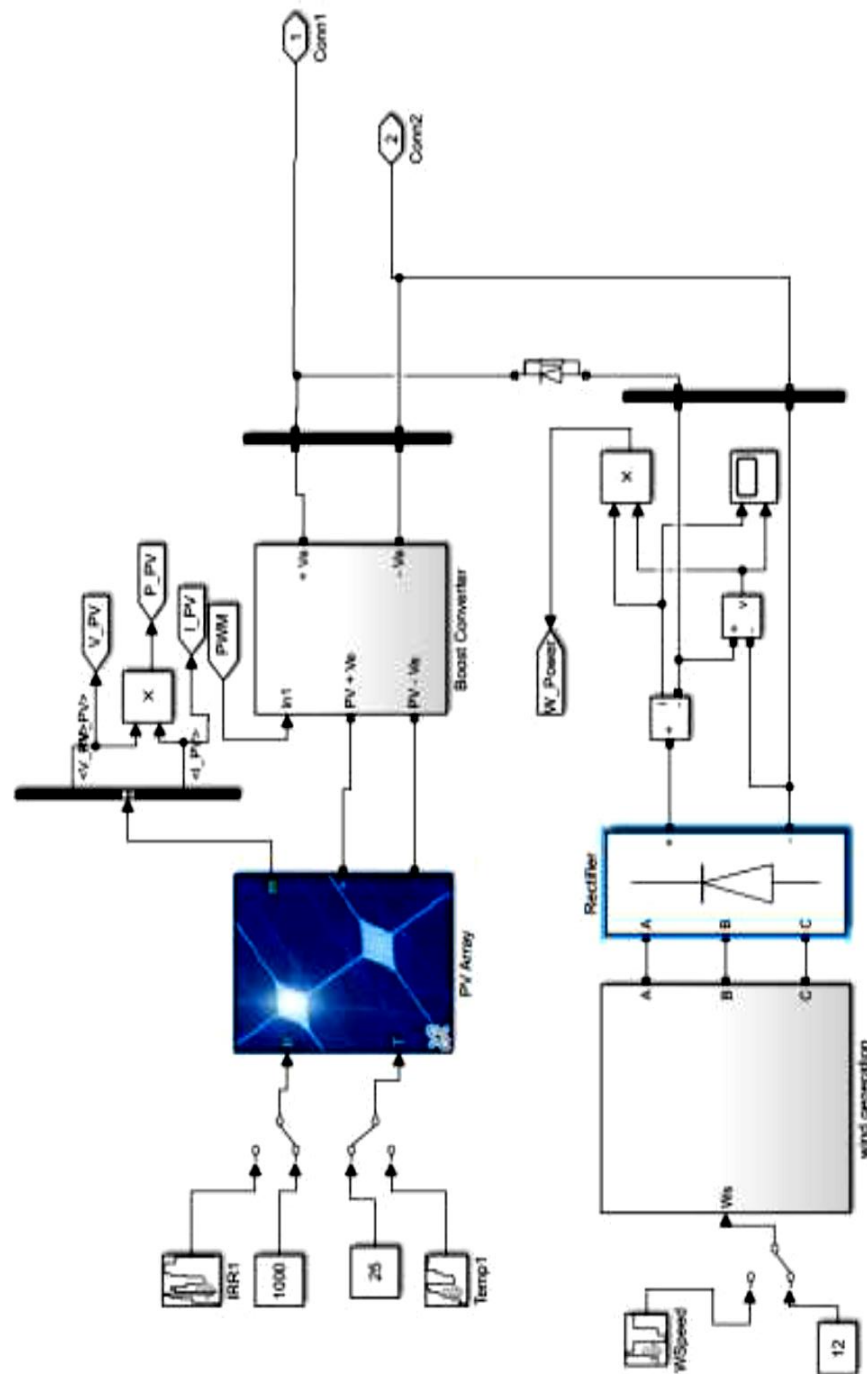


Рисунок 3.16 - Комбінована потужність фотоелектричної та вітрової турбіни в MATLAB/Simulink

Третє навантаження - це навантаження скидання, яке може бути підключене лише у випадку, якщо енергія, що генерується відновлюваними джерелами, перевищує потребу навантаження, а стан акумулятора знаходиться на максимальному рівні. Однак, навантаження є постійними, але контролюються таким чином, що вони можуть вмикатися і вимикатися в різний час, як показано в кожному сценарії.

## 1-й СЦЕНАРІЙ

У цьому сценарії система складається з відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектрична і вітрова турбіни, з'єднаних через шину для об'єднання їх вихідної потужності, а також з'єднаних безпосередньо з навантаженням і акумулятором, зверніть увагу, що житловий будинок не має інших джерел енергії, крім цього. Відновлювана енергія, що генерується фотоелектричною та вітровою турбінами, використовується для живлення побутового навантаження (змінного та постійного струму) в острівній мікромережі, де навантаження 1 є навантаженням постійного струму і складається з трьох піднавантажень, які вмикаються та вимикаються вимикачами в різний час і всі вони з'єднані паралельно, а друге навантаження є навантаженням змінного струму, що складається з двох піднавантажень, з'єднаних паралельно, які контролюються вимикачами і вмикаються та вимикаються в різний час. Таким чином, початковий стан батареї вважається 89%, щоб мати можливість розрядити або зарядити батарею в будь-який час. І швидкість вітру, і сонячне випромінювання є дещо змінними, тоді як навантаження складається з різних споживачів, які можуть вмикатися і вимикатися в різний час.

На рисунку 3.17 показано потужність навантаження, SOC акумулятора, потужність, що генерується вітрогенератором, і потужність, що генерується фотоелектричною системою. Отже, як видно з першого ряду, профіль навантаження змінюється в залежності від часу, найнижче зафіксоване навантаження становить 2000 Вт, а найвище - 8000 Вт. Другий ряд показує стан заряду батареї (SOC), який також змінюється, очевидно, що від 0 секунд до 40 секунд SOC зростає, оскільки генерована потужність перевищує навантаження, в той час як від 40 секунд до 120 секунд SOC залишається постійним, оскільки немає надлишкової енергії для зарядки батареї, оскільки генерована потужність точно відповідає потребам навантаження. У 3-му рядку представлена потужність вітрової турбіни, яка не є постійною через зміну швидкості вітру, і початкова вихідна потужність вітру дорівнює 0, потужність вітрової турбіни

досягає свого нормального стану через 10 секунд і зростає до 60 секунд, потім трохи зменшується з 60 секунд до 80 секунд через вищезгадану причину, найнижча потужність вітру становить близько 2000 Вт, тоді як найвища - близько 5000 Вт. У 4-му рядку представлена потужність фотоелектричних станцій з найнижчою потужністю 3000 Вт і найвищою 3600 Вт. Отже, виходячи з наведених нижче результатів, запропонований алгоритм може відстежувати переміщення навантаження, отже, потужність, що генерується відновлюваними джерелами енергії (ФЕС та Вітер), здатна підтримувати навантаження протягом повного процесу, а батарея здатна заряджатися за рахунок надлишкової потужності.

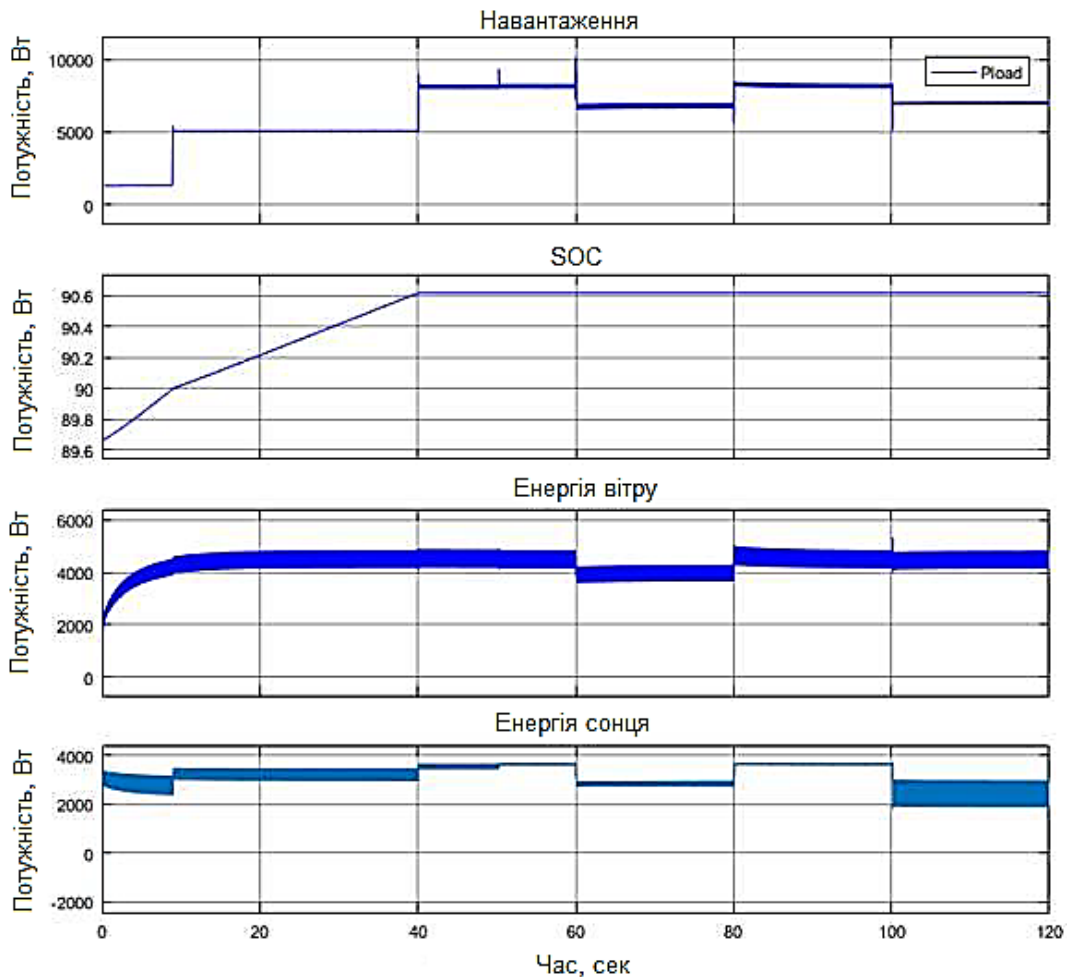


Рисунок 3.17 - Електричне навантаження, SOC акумулятора, вітрова та фотоелектрична енергія

На рисунку 3.18 представлено кількість енергії, що споживається з акумулятора або накопичується акумулятором, а також потужність, що генерується відновлюваними джерелами енергії (вітровою турбіною та фотоелектричними модулями). У 1-му рядку представлено потужність від відновлюваних джерел енергії (вітрової турбіни і фотоелектричних модулів) з найменшим значенням 5000 Вт і найбільшим 9000 Вт, а в 2-му рядку - розряджена або накопичена потужність акумулятора. Зрозуміло, що з 0 секунд до 10 секунд батарея накопичує до 6500 Вт енергії з відновлюваних джерел, в той час як з 10 секунд до 20 секунд батарея все ще накопичує енергію, але до 4000 Вт, потім з 40 секунд до 120 секунд батарея не накопичує і не віддає енергію, оскільки навантаження і згенерована потужність однакові.

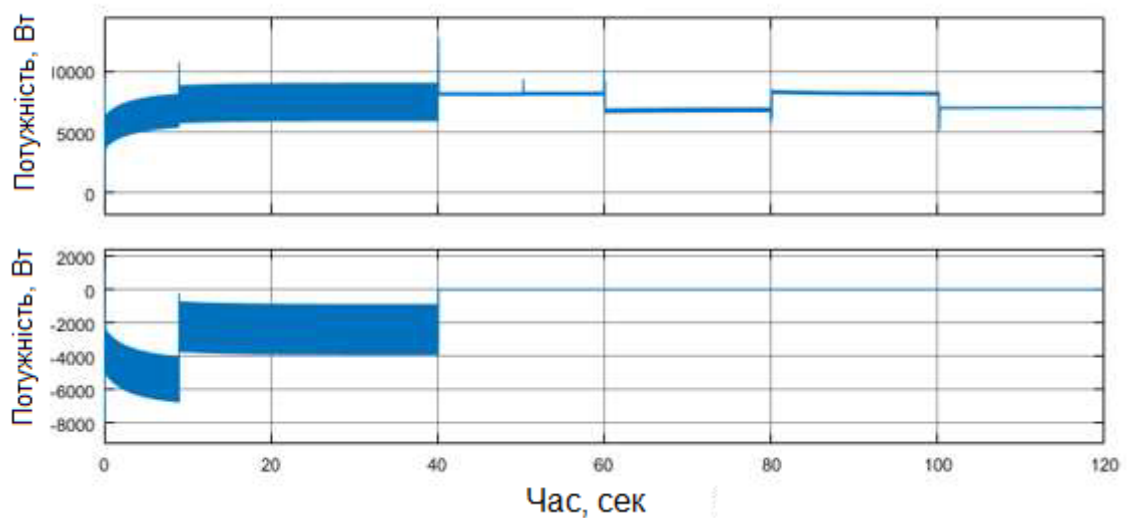


Рисунок 3.18 – Потужність навантаження та потужність акумулятора з часом

У таблиці 3.5 наведено результати першого сценарію.

Таблиця 3.5 - Зведені результати третього сценарію

| Назва                | Значення                                                                                               |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Навантаження         | Розмір: 8000 Вт<br>Найбільше навантаження = 8000 Вт<br>Найменше навантаження = 2000 Вт                 |
| Батарея              | Початковий SOC батареї: 89 %<br>$SOC_{min} = 40\%$<br>$SOC_{max} = 90\%$<br>Потужність батареї 6900 Вт |
| PV + вітрова турбіна | Максимальна потужність 9000 Вт<br>Мінімальна потужність = 5000 Вт<br>Напруга: 230 В                    |

## 2-Й СЦЕНАРІЙ

Для другого сценарію профіль навантаження повністю змінюється, а початковий рівень заряду батареї знижується до 48%, при цьому швидкість вітру залишається незмінною, а сонячне випромінювання трохи змінюється, щоб перевірити здатність розробленої системи управління енергоспоживанням адаптуватися до змін у системі. Система трохи змінюється, і система все ще може реагувати на зміни. Тоді під час моделювання для другого сценарію були отримані наступні результати.

На рис. 3.19 показано навантаження, стан заряду акумулятора (SOC), потужність вітрової турбіни та потужність фотоелектричної системи (PV). Отже, як показано в першому рядку, потреба в навантаженні змінюється в залежності від часу, це пояснюється тим, що перемикачі запрограмовані таким чином, що вони можуть бути ввімкнені і вимкнені в різний час, найнижче навантаження становить близько 2000 Вт, а найвище - близько 8000 Вт. Другий ряд показує стан заряду батареї, який також змінюється, від 0 секунд до 120 секунд SOC збільшується, що означає, що батарея заряджається від

надлишкової потужності. 3-й ряд показує потужність вітрогенератора, яка не є постійною, потужність вітру досягає нормального рівня через 5 секунд і лише незначно змінюється між 60 і 80 секундами через зміну швидкості вітру. 4-й ряд показує потужність фотоелектричної станції, яка змінюється між 3000 Вт і 3600 Вт. Таким чином, виходячи з наведених нижче результатів видно, що запропонована система керування може миттєво реагувати на зміни в системі як з боку навантаження, так і з боку відновлюваних джерел, оскільки видно, що потужність, згенерована відновлюваними джерелами (фотоелектричними модулями та вітрогенератором) була здатна підтримувати навантаження протягом усього процесу, а також заряджати акумуляторну батарею у випадку надлишку потужності, це свідчить про те, що запропонована система здатна виконувати покладені на неї обов'язки.

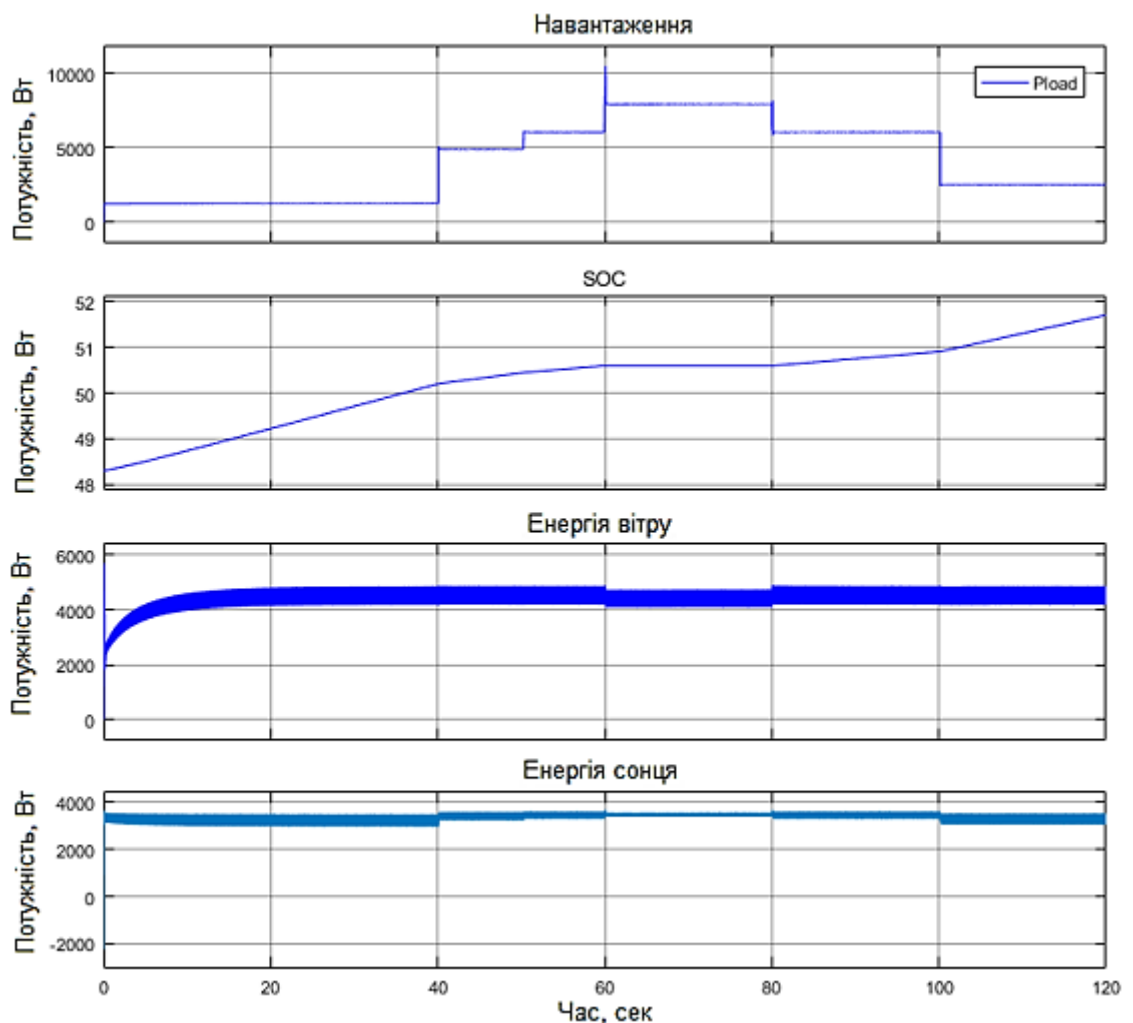


Рисунок 3.19 - Електричне навантаження, SOC акумулятора, вітрова та фотоелектрична енергія

На рисунку 3.20 представлено потужність від відновлюваних джерел енергії (вітру та фотоелектричної енергії), а також потужність, що споживається або розряджається від акумулятора (потужність акумулятора). Таким чином, потужність від відновлюваних джерел енергії (фотоелектричні та вітрові турбіни) дещо змінилася з піковим значенням 8500 Вт. Другий рядок показує потужність, накопичену акумулятором або розряджену з акумулятора, щоб задовольнити потребу навантаження протягом 120 секунд. Електроенергія від акумулятора подається тільки тоді, коли енергії, виробленої з відновлюваних джерел (фотоелектричні модулі та вітрогенератори), недостатньо для задоволення потреби в енергії для навантаження. Електроенергія, що надходить від акумулятора, доповнює енергію з відновлюваних джерел (фотоелектричні модулі та вітрогенератори) для задоволення попиту на електроенергію. Тому, як видно з другого ряду на Рисунку 3.22, з 0 секунд до 40 секунд батарея отримувала майже 6000 Вт, тому що потужність, що генерується, перевищує потужність навантаження.

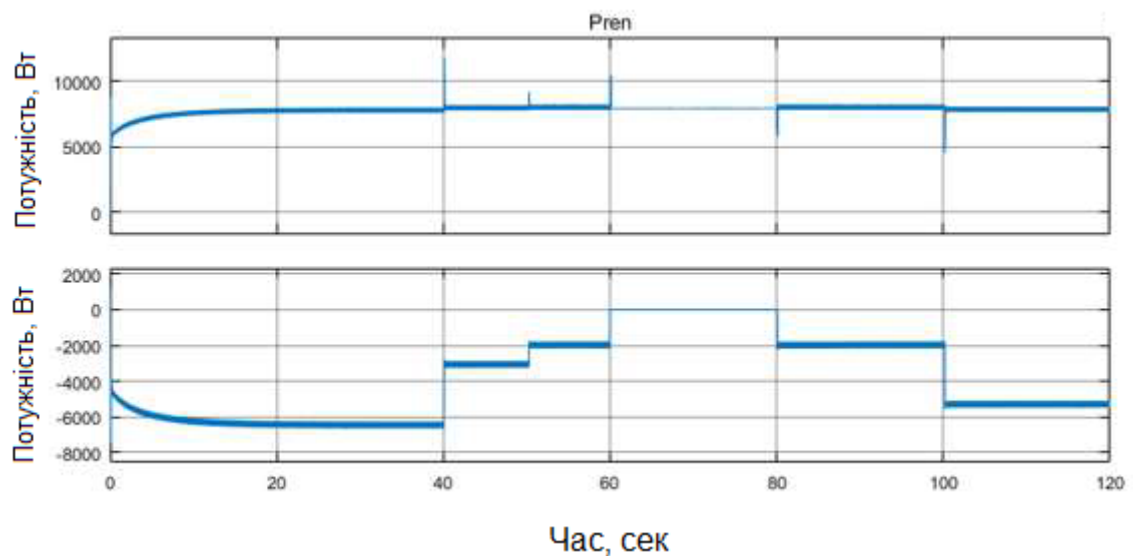


Рисунок 3.20 - Потужність навантаження та потужність акумулятора з часом

Від 40 секунд до 60 секунд потужність, яку споживає батарея, зменшується з 3000 Вт до 2000 Вт, від 60 секунд до 80 секунд, коли навантаження зростає, батарея перестає заряджатися, оскільки потужність, що

генерується відновлюваними джерелами (фотоелектричними модулями та вітрогенераторами), дорівнює потужності навантаження. З 80 до 100 секунд батарея отримувала 2000 Вт, з 100 до 120 секунд батарея отримувала 5000 Вт, оскільки потужність навантаження зменшилася. У таблиці 3.6 наведено зведені результати другого сценарію.

Таблиця 3.6 – Зведені результати другого сценарію

| Назва                | Значення                                                                                              |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Навантаження         | Розмір: 8000 Вт<br>Найбільше навантаження = 8000 Вт<br>Найменше навантаження = 2000 Вт                |
| Батарея              | Початковий SOC батареї: 48%<br>$SOC_{min} = 40\%$<br>$SOC_{max} = 90\%$<br>Потужність батареї 6900 Вт |
| PV + вітрова турбіна | Максимальна потужність: 8500 Вт<br>Мінімальна потужність = 3000 Вт<br>Напруга: 230 В                  |

### 3-Й СЦЕНАРІЙ

У цьому сценарії початковий стан заряду батареї становить 89%, а профіль навантаження повністю змінений, а також сильно змінена швидкість вітру і сонячне випромінювання, навантаження також вмикається і вимикається в різний час. Незважаючи на варіацію результатів через зміну швидкості вітру, сонячної радіації та навантаження, система управління енергоспоживанням все ще може реагувати на зміни в системі.



На рисунку 3.21 показано потужність навантаження, SOC акумулятора, потужність, що генерується вітрогенератором, і потужність, що генерується фотоелектричною системою.

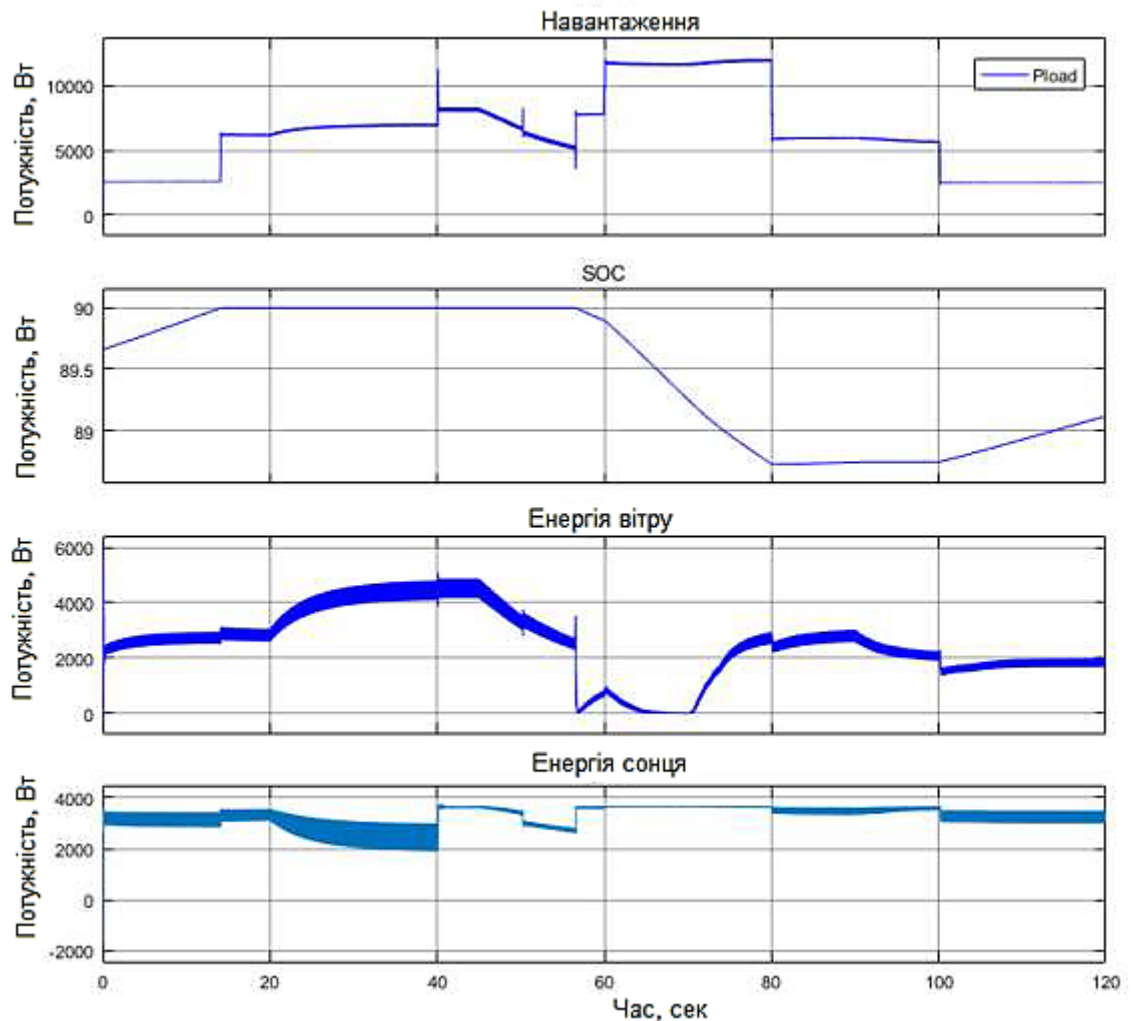


Рисунок 3.21- Енергетичне навантаження, SOC акумулятора, вітрової та фотоелектричної енергії

Отже, 1-й рядок показує, що потужність навантаження змінюється в залежності від часу, найнижче навантаження становить близько 3500 Вт, а найвище - близько 12000 Вт. Другий ряд показує стан заряду батареї, який також змінюється, видно, що з 0 секунд до 15 секунд SOC збільшується, в той час як з 15 секунд до 55 секунд SOC постійний, з 55 секунд до 80 секунд SOC зменшується, оскільки навантаження було збільшено, з 80 секунд до 100 секунд SOC постійний, потім з 100 секунд до 120 секунд SOC трохи збільшується. 3-й ряд представляє потужність вітрової турбіни, яка не є постійною, найнижча

потужність вітру становить близько 0 Вт, а найвища - близько 5000 Вт. 4-й ряд представляє потужність від фотоелектричної станції, яка змінюється від 2000 Вт до 3600 Вт. Таким чином, на основі наведених нижче результатів видно, що запропонована система управління може реагувати на зміну навантаження, оскільки видно, що потужність, вироблена відновлюваними джерелами енергії, була здатна підтримувати навантаження протягом усього процесу, а акумуляторна батарея могла заряджатися від надлишкової потужності, а також розряджатися у випадку, якщо потужність, вироблена відновлюваними джерелами енергії, була не в змозі підтримувати навантаження.

На рис. 3.22 представлено потужність відновлюваних джерел енергії (вітрові турбіни та фотоелектричні станції), а також потужність акумуляторних батарей. Таким чином, 1-й рядок представляє потужність відновлюваної енергії, яка змінюється між 3000 Вт і 8000 Вт.

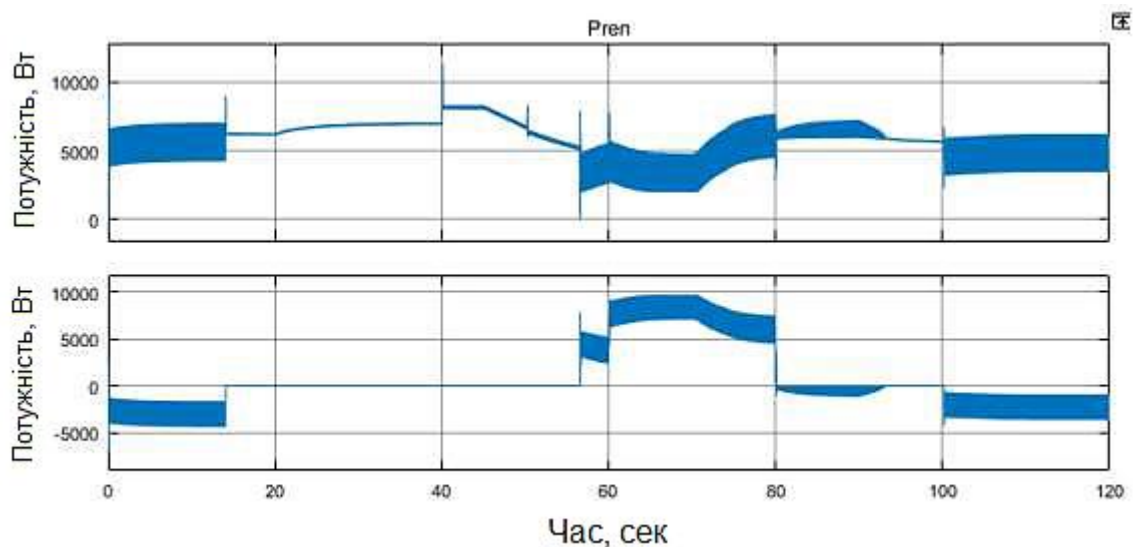


Рисунок 3.22 - Потужність навантаження та потужність акумулятора з часом

У 2-му рядку показана потужність, накопичена акумулятором або витрачена з акумулятора, видно, що з 0 секунд до 15 секунд акумулятор накопичує майже 3000 Вт енергії з відновлюваних джерел, це пов'язано з тим, що був надлишок енергії, в той час як з 15 секунд до 55 секунд акумулятор не отримує і не віддає енергію, оскільки потужність, що генерується

відновлюваною енергією, дорівнює потужності навантаження. Потім з 55 секунди до 80 секунди майже 9000 Вт енергії розряджається з акумулятора для живлення навантаження, оскільки кількість енергії, виробленої вітровою системою, близька до нуля в цей час, а фотоелектрична потужність дуже низька порівняно з попитом, з 80 до 100 секунди акумулятор не отримує і не віддає енергію, з 100 секунди до 120 секунди акумулятор накопичує майже 3000 Вт від відновлюваної енергії, оскільки згенерована потужність стає вищою, ніж навантаження. У таблиці 3.7 наведено результати, отримані для третього сценарію.

Таблиця 3.7 – Зведені результати другого сценарію

| Назва                | Значення                                                                                             |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Навантаження         | Розмір: 12000 Вт<br>Найбільше навантаження = 12000 Вт<br>Найменше навантаження = 3500 Вт             |
| Батарея              | Початковий SOC батареї: 89%<br>$SOC_{min} = 40\%$<br>$SOC_{max} = 90\%$<br>Потужність батареї 9000Вт |
| PV + вітрова турбіна | Максимальна потужність: 8000 Вт<br>Мінімальна потужність = 3000 Вт<br>Напруга: 230 В                 |

### 3.5 Висновки до розділу

1. Проведено моделювання та реалізацію всіх математичних моделей, які відтворюють роботу кожного пристрою, і детально опрацьовані для отримання точних результатів для проектованої системи.
2. Проведено математичне моделювання кожного компонента та його

характеристик, таких як вхідна напруга, вихідна напруга, вихідна потужність, вхідна потужність і т.д. Дане моделювання проведено і реалізовано в Simulink/MATLAB.

3. Представлено результати моделювання та проведена оцінка ефективності запропонованої системи за різних умов. Таким чином, представлені результати, отримані за допомогою Simulink/ MATLAB, щодо продуктивності всієї системи та системи управління для енергоустановки, що складається з фотоелектричної, вітрової турбіни та акумуляторної системи.

4. Для тестування системи управління енергоспоживанням розглянуто різні сценарії, які відрізняються зміною сонячного випромінювання, температури та швидкості вітру. Таким чином, результати показали, що запропонована система управління може витримувати будь-які зміни навантаження в будь-який час доби без будь-яких збоїв.

## **4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Фізичні основи електробезпеки**

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [21,22].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, токопроводи електромережі електрично

зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

#### **4.2 Інструктажі з охорони праці**

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажів з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [21,22].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;

- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;

- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;

- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;

- який буде виконувати нову для нього роботу;

- . - відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [21,22].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;

- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;

- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;

- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;

- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;

- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.



Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

#### **4.3 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки**

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку [21,22].

Електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному - біля 15-20 %. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80 % електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30 %.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки.

В порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначати наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання;

- електротравми можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробії повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

- розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано поняття мікромережа та її роль в системі електропостачання. Проаналізовано типи мікромереж та системи управління мікро-електромережою.
2. Представлено методики для розрахунків фотоелектричного елементу, потужності фотоелектричної системи, вітрогенераторів й акумулятора електроенергії в мікро-електромережі на основі вітро-сонячної енергоустановки.
3. Проведено моделювання кожного компонента мікро-електромережі в Simulink/MATLAB з метою визначення його характеристик, таких як вхідна напруга, вихідна напруга, вихідна потужність, вхідна потужність.
4. Запропонована система управління спрямована на мінімізацію втрат енергії шляхом адекватного розподілу енергоресурсів між навантаженнями житлового будинку при одночасному задоволенні попиту на енергію житлового домогосподарства, розташованого в сільській місцевості, за рахунок впровадження 100% мікромережевої відновлюваної енергетики.
5. Представлено результати моделювання з використанням інструментарію Sim-power в середовищі MATLAB для перевірки працездатності запропонованої моделі енергоменеджменту. Таким чином, результати показали, що запропонована модель має потенціал для розподілу доступної енергії в будь-який час доби без будь-яких перешкод, а наявність акумуляторної батареї відіграє важливу роль у цій моделі, оскільки вона здатна забезпечити залишок енергії у випадку, якщо фотоелектричні та вітрові джерела не зможуть задовольнити попит на електроенергію в будь-який час.
6. Для тестування системи управління енергоспоживанням розглянуто різні сценарії, які відрізняються зміною сонячного випромінювання,

температури та швидкості вітру. Таким чином, результати показали, що запропонована система управління може витримувати будь-які зміни навантаження в будь-який час доби без будь-яких збоїв.

7. Недоліком запропонованої моделі є те, що надлишок енергії, згенерованої з відновлюваних джерел, може бути спрямований лише на скидне навантаження, щоб уникнути надлишку згенерованої енергії, або іншим рішенням є збільшення кількості акумуляторних батарей, щоб мати можливість зберігати всю надлишкову згенеровану енергію, що, в свою чергу, буде бар'єром через збільшення ціни системи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Abo-Al-Ez, K. M., Xia, X., & Zhang, J. (2012, August). Smart interconnection of a PV/wind DG micro grid with the utility distribution network. In 2012 Proceedings of the 9th Industrial and Commercial Use of Energy Conference (pp. 1-8). IEEE.
2. Керея Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керея, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.
3. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
4. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
5. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
6. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.—С. 80–81.
7. 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

8. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021

9. 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.

10. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

11. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204.

12. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.

13. Sumathi, S., Ashok Kumar, L., Surekha, P. (2015). RETRACTED CHAPTER: Application of MATLAB/SIMULINK in Solar PV Systems. In:

RETRACTED BOOK: Solar PV and Wind Energy Conversion Systems. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7_2)

14. Bouharchouche, A., Berkouk, E. M., & Ghennam, T. (2013, March). Control and energy management of a grid connected hybrid energy system PV-wind with battery energy storage for residential applications. In 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) (pp. 1-11). IEEE.

15. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 85-86.

16. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.

17. Choi, Y. M., & Lim, D. J. (2018). Automatic feasible transition path generation from UML state chart diagrams using grouping genetic algorithms. Information and Software Technology, 94, 38-58.

18. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

19. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

20. Motapon, S. N., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2013). A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. IEEE transactions on industrial electronics, 61(3), 1320-1334.

21. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.

22. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Основи охорони праці. — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.